

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH

Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme gGmbH | 29. März 2018

# Technologiebericht

## 7.4 Systemintegration, -innovation und -transformation innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende

---

Frank Merten (WI)

Dietmar Schüwer (WI)

Juri Horst (IZES)

Patrick Matschoss (IZES)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

**Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:**

Merten, F.; Schüwer, D.; Horst, J; Matschoss, P. (2018): Technologiebericht 7.4 Systemintegration, -innovation und -transformation. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

**Kontakt:**

Frank Merten

Tel.: +49 202 / 2492 - 126

E-Mail: [frank.merten@wupperinst.org](mailto:frank.merten@wupperinst.org)

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH

Döppersberg 19

42103 Wuppertal

**Review durch:**

Simon Hirzel (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung (Steckbrief)</b>	<b>8</b>
<b>1 Hintergrund</b>	<b>10</b>
<b>2 Beschreibung des Technologiefeldes</b>	<b>12</b>
2.1 Definitionen von Systemintegration, -innovation und -transformation	12
2.1.1 <i>Systemintegration</i>	12
2.1.2 <i>Systeminnovation</i>	13
2.1.3 <i>Systemtransformation</i>	14
2.2 Energiewende in der Multi-Level-Perspective (MLP)	15
2.2.1 <i>Energiewende als Transformationsprozess</i>	15
2.2.2 <i>Ansatzpunkte für die Anwendung der MLP auf die Energieforschung zur Energiewende</i>	18
<b>3 Ableitung von Forschungsbedarf am Beispiel von zwei ausgewählten Technologiefeldern</b>	<b>22</b>
3.1 „Systemischer“ F&E-Bedarf im Technologiefeld Wärmenetze	23
3.1.1 <i>Ausgangszustand</i>	23
3.1.2 <i>Zielzustand</i>	23
3.1.3 <i>Systemtransformation</i>	24
3.1.4 <i>MLP und abgeleitete Forschungsfragen</i>	26
3.2 „Systemischer“ F&E-Bedarf im Technologiefeld Windenergie	29
3.2.1 <i>Windenergie in der Multi-Level-Perspective: Konkurrenz zum Regime</i>	29
3.2.2 <i>Soziotechnischer Wandel des Regimes</i>	30
3.2.3 <i>F&amp;E-Bedarf Technologieentwicklung und Systemintegration</i>	31
3.2.4 <i>F&amp;E-Bedarf Systeminnovation</i>	31
3.2.5 <i>F&amp;E-Bedarf Systemtransformation (Systemanalyse)</i>	32
<b>4 F&amp;E-Empfehlungen für die öffentliche Hand</b>	<b>34</b>
4.1 Ausrichtung an Transformationsphasen der Energiewende	34
4.2 Stärkung experimenteller und umsetzungsorientierter Forschung durch Reallabore	36
4.2.1 <i>Warum und wozu Reallabore?</i>	36
4.2.2 <i>Was sind Reallabore?</i>	37
4.2.3 <i>Chancen, Risiken und Grenzen von Reallaboren</i>	38
4.2.4 <i>Was folgt daraus für die künftige Energieforschung?</i>	39

4.3	Forschungsbedarfe in den Bereichen Systemintegration, -innovation und -transformation (inkl. Systemanalyse)	39
4.3.1	<i>F&amp;E-Bedarf im Bereich Technologieentwicklung und Systemintegration</i>	39
4.3.2	<i>F&amp;E-Bedarf im Bereich Systeminnovationen als neues Forschungsfeld</i>	40
4.3.3	<i>F&amp;E-Bedarf im Bereich Systemtransformation (Systemanalyse)</i>	40
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>41</b>

## Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

### Abkürzungen

COP	Conference of the Parties
EE	Erneuerbaren Energien
EED	Energy Efficiency Directive = Europäische Energieeffizienzrichtlinie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive = EU-Gebäuderichtlinie
ETS	(European Union) Emissions Trading System = (Europäisches) Emissionshandels-system
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FEE	Fluktuierende Erneuerbare Energien
FW	Fernwärme
GEG	Gebäudeenergiegesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
MLP	Multi-Level-Perspective
NOVA	Netz-Optimierung vor Verstärkung vor Ausbau
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X (Oberbegriff für power-to-gas etc.)
PV	Photovoltaik
ST	Solarthermie
V2G	Vehicle-to-Grid
WoO	Window of Opportunity

### Einheiten und Symbole

%	Prozent
°C	Grad Celsius
€	Euro



## Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Beispiele für Wärmenetz-relevante Nischen-(System-)Innovationen, ihre Treiber und Akteure -----	26
----------	---	----

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Multi-Level-Perspective bezogen auf soziotechnische Übergänge -----	17
Abb. 3-1	Allgemeine Darstellung der MLP-Ebenen (als Basis für die folgenden Fallanalysen)-----	22
Abb. 3-2	Das Wärmenetz als Sammler und Lieferant für eine Vielfalt zukunftsfähiger Versorgungsoptionen -----	24
Abb. 3-3	Modell der vier Transformationsphasen (Generationen) für Wärmenetze (Haken = LowEx-fähige Technologien und Konzepte) -----	25
Abb. 3-4	MLP-Darstellung für die Transformation von Wärmenetzen-----	27
Abb. 4-1	Die Transformationsphasen des Energiesystems (vergrößerter Auszug aus der Abbildung zwecks besserer Lesbarkeit) -----	35
Abb. 4-2	Hauptphasen der Transformation des Energiesystems-----	35

## Zusammenfassung (Steckbrief)

<b>Technologiefeld Nr. 7.4</b> <b>Systemintegration, -innovation und -transformation</b>	  <b>Wuppertal Institut</b>
<b>A) Status quo und neue Forschungs-Herausforderungen</b>	
<p>Einzeltechnologien stehen bisher im Fokus der nationalen Energieforschungsprogramme (EFP) und der 30 Technologiefelder, die im Rahmen dieses Vorhabens betrachtet werden. Mit der Energiewende nehmen die Wechselwirkungen der Technologien untereinander sowie mit dem Energiesystem deutlich zu. Damit werden Aspekte wie Systemintegration, -innovation und -transformation zunehmend wichtiger. Im Rahmen des 6. EFP (2011-2018) sind diese zwar angesprochen, aber noch nicht hinreichend vertieft worden. Dies sollte im kommenden 7. EFP aufgegriffen werden und dabei sollten die nachfolgenden systemischen und sozio-technischen Herausforderungen, die über einzeltechnologische Bezüge hinausgehen, Beachtung finden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunahme an technologischen Lösungsmöglichkeiten, Komplexität, Unsicherheiten und Anforderungen an die Gestaltung der Energiewende auf allen Ebenen (kommunal bis global) – dazu gehören u. a. REG-, Netz- &amp; Speicherausbau, Dezentralisierung, Sektorenkopplung, Power-to-X, Dekarbonisierung aller Sektoren, Strom- und Wärmemarkt-Transformation, Digitalisierung, neue Akteurskonstellationen, Bürgerbeteiligung</li> <li>- Zunehmende Lücke zwischen realer Treibhausgasreduktion und Klimaschutzzielen.</li> <li>- Zunehmender Einfluss exogener, globaler Faktoren wie z. B. Politik-, Standard-, Software- und Technikentwicklungen im Ausland (z. B. Stromspeicher- und Digitalisierungstechniken aus Asien und den USA).</li> <li>- Wachsende Bedeutung von nicht-technischen Dimensionen (ökologisch, sozio-ökonomisch, politisch und kulturell) und damit von Transformationswissen und transdisziplinärer (partizipativer) Forschung.</li> </ul>	
<b>B) Vorgehensweise zur Ableitung von neuen Forschungsbedarfen</b>	
<p>Zur Herstellung eines besseren Verständnisses werden zunächst „zentrale“ Definitionen entwickelt. Aufgrund der Komplexität der Energiewende wird die <i>Multi-Level-Perspective</i> als methodischer Rahmen für die Ableitung von Forschungsfragen gewählt. Dies erfolgt methodisch zunächst am Beispiel von drei Technologiefeldern (siehe Bericht). Deren Ergebnisse werden übergreifend auf die Ebene des gesamten Energiesystems übertragen.</p>	
<b>Definitionen zu Systemintegration, -innovation und -transformation für die Energieforschung</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1   <i>System-Integration</i> erfolgt fortlaufend als Anpassung des Systems an (einzelne) Veränderungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Maßnahmen, die von Marktakteuren oder der Regulierungsinstanz ergriffen werden und einen Beitrag zur Optimierung des (räumlichen und zeitlichen) Zusammenspiels fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung (FEE), Last und Infrastruktur im Energiesystem leisten.</li> </ul> </li> <li>2   <i>System-Innovation</i> umfasst (basierend auf Systemintegrationen) proaktive Aktionen zur Systemveränderung: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ durch Weiterentwicklung bzw. Verbreitung innovativer Energiewendetechnologien entstehen neue Markt-Strategien, Akteure und Dienstleistungen, Versorgungsprodukte bzw. -portfolios, technologieübergreifende Rahmenbedingungen sowie Anpassungen und Erweiterungen bestehender energietechnischer Infrastrukturen, so dass fossile, nicht nachhaltige Technologien und Strukturen verdrängt werden. Die neuen Rahmenbedingungen geben selbst wieder Impulse für System-Innovationen.</li> </ul> </li> <li>3   <i>System-Transformation</i> ist zugleich Ziel, Gesamtprozess (inkl. gesellschaftlicher Fragen) und Resultat: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ komplexer Gesamtprozess einer kontinuierlichen und langfristig angelegten Umgestaltung des fossil dominierten Energieversorgungssystems hin zu einem erneuerbaren System mit hohen Anteilen fluktuierender Energien.</li> <li>□ soziotechnischer Prozess, der neben dem technologischen auch den organisatorisch-gesellschaftlichen Wandel umfasst, der mit dem langfristigen Umbau des Energieversorgungssystems einhergeht.</li> </ul> </li> </ol>	



### Multi-Level-Perspective (MLP) als Analyserahmen

Als analytischer Rahmen dient die MLP nach Geels, die Systemtransformationen ex-post als Prozess über drei Ebenen (Nischen, Regime, Landscape) erklärt. In der *Nischen-Ebene* entstehen radikale Innovationen, die Veränderungsdruck auf etablierte Regime(strukturen) ausüben. Die soziotechnische *Regime-Ebene* stellt den bestehenden, aber gestaltbaren Rahmen dar, der alle vorherrschenden technisch-ökonomischen, politischen, kulturellen sowie Akteurs-, Markt-, Nutzungs- und Verhaltenskonstellationen umfasst. Die *Landscape-Ebene* besteht aus exogenen Rahmenbedingungen, die das Regime graduell (Klimawandel, Demographie) oder disruptiv (Krieg, Fukushima) beeinflussen. Zu einer Transformation kommt es, wenn sich radikale Innovationen durchsetzen, z. B. durch das Zusammenwirken von Landscape-Druck, regime-internen Spannungen, aber auch erfolgreichen Dynamiken und Entwicklungen in der Nische, und so eine Regimestruktur nachhaltig verändern.

### C) Forschungsbedarf

#### F&E-Bedarf im Bereich **Technologieentwicklung und Systemintegration**

- Soziotechnische Begleitforschung (ex-post und ex-ante) zu allen technologischen Förderinitiativen und -projekten mit Fokus auf Umsetzungsdefizite, Wechselwirkungen zwischen Technologien, Systemdienlichkeit und Rückwirkungen auf das Energiesystem sowie zu Akteurseinflüssen (incumbent & emerging actors), Umweltwirkungen (Ressourcen-/Flächenverbrauch...), Akzeptanz, Regulierung (inkl. Nachfrageseite)
- Frühzeitige transdisziplinäre Einbindung von Stakeholdern (zum Beispiel in Form von Reallaboren) entlang der gesamten Wertschöpfungskette in die F&E-Arbeiten (inkl. Begleitforschung), z. B. beim Übergang in die Technikumsphase bzw. vor Pilotierung, um *Stranded Research* wie z. B. bei CCS zu vermeiden.

#### F&E-Bedarf im Bereich **Systeminnovationen als neues Forschungsfeld**

- Identifikation und Bewertung von möglichen bzw. nötigen *Systeminnovationen* für eine proaktive Gestaltung der Energiewende. Dabei sind insbesondere Rolle und Potenzial von zunehmender Dezentralisierung, Sektorkopplung und Digitalisierung zu berücksichtigen.
- Untersuchungen (Potenzialanalysen) zur Flexibilisierung von vielfältig einsetzbaren Flex-Optionen (insbesondere PtX und Speicher) z. B. mittels Hybridisierung von Auslegungen zwecks adaptiven Einsatzstrategien.

#### F&E-Bedarf im Bereich **Systemtransformation (Systemanalyse)**

- Szenarien und Modelle für ambitioniertere THG-Reduktionsziele (mindestens 95 %) sowie an Transformationsphasen und deren Übergängen, um Lock-In Effekte zu erkennen/reduzieren.
- Defizit- und Hemmnis-Analysen zur Identifikation, Bewertung und Lösung von Lücken zwischen der Energiewendeforschung und Umsetzung der Energiewende sowie von Reboundeffekten. Daraus zusätzliche Entwicklung von effektiven Market-pull- und Management-Instrumenten für eine bessere und agilere Verbreitung von Technologien, Systeminnovationen und des gesamten Energiewendeprozesses.
- Narrative Szenarien zur Energiewende, um neue wichtige Forschungsfragen für die Technologieentwicklung als auch die Modellierung abzuleiten, z. B. zu Suffizienz und Resilienz sowie geopolitischen Abhängigkeiten (bspw. Wirtschafts- und Energiepolitik von China, Indien und USA) oder angrenzender Märkte (bspw. Ersatzstoffe für Erdöl- und Raffinerieprodukte in Bau- und Chemieindustrie).
- Erweiterung von bisher kostenoptimierenden quantitativen Energiemodellen um soziotechnische Bewertungen
- Analysen zu Pfadabhängigkeiten, Lock-In Effekten, Unsicherheiten, Risiken (Disruptionen), nicht-linearen Entwicklungen und zu Verhalten (Rollen) von Stakeholdern diesbezüglich.
- Umsetzungsorientierte, ambitionierte kurz- bis mittelfristige Analysen („Energiewende in a hurry“). Dazu Identifikation von *Windows-of-Opportunities* (WoO) und von pro-aktiven, „schnellen“ Regime-Änderungen (zur Schaffung von WoO).

## 1 Hintergrund

Die anwendungsorientierten nationalen Energieforschungsprogramme (EFP) sind seit ihrem Start im Jahr 1977 durch verschiedene gesellschaftspolitische und wirtschaftliche Hintergründe geprägt und verfolgen dementsprechend ausgerichtete Forschungsziele und technologische Schwerpunkte. Dabei ist im Zeitverlauf neben einer Intensivierung der Forschung zu energieeffizienten und erneuerbaren Energietechnologien eine zunehmende Orientierung an Klimaschutz- und Systemanforderungen zu beobachten. Die Aufnahme des energiepolitischen Zieldreiecks (Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit) und Erforschung von Systemzusammenhängen findet erstmals explizit im 3. EFP (1990-1996) statt. Bis einschließlich zum 5. EFP (2005-2010) liegt der inhaltliche Schwerpunkt auf Energietechnologien und der finanzielle Schwerpunkt in den Bereichen nukleare Energieforschung und Kernfusion (Wagner 2017). Mit dem letzten Übergang zum 6. EFP (Energieforschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2011-heute) kommt es sowohl begrifflich als auch inhaltlich zu einer stärkeren Ergänzung der Technologieforschung durch Systemanalysen und zu einer direkten Ausrichtung auf die Ziele der Energiewende in Deutschland (BMWi 2017b, DPG 2017, Hauff 2017).

Der anstehende Übergang zum 7. EFP wird nach (BMWi 2018) im Wesentlichen durch folgende generelle Entwicklungen geprägt sein: (1) neue, ambitioniertere Klimaschutzziele gemäß der COP 21 (2015 in Paris), d. h. Dekarbonisierung der Energieversorgung bis zum Jahr 2050, (2) weiter zunehmende Dezentralisierung der Energieversorgung sowie (3) parallel stattfindende, teils sehr dynamische Digitalisierung aller Wirtschaftsbereiche. „Ein wichtiger Fokus des neuen Energieforschungsprogramms liegt daher auf der Optimierung des aus verschiedenen Energietechnologien bestehenden Gesamtsystems der Energieversorgung und der intelligenten Sektorkopplung.“ (ebd.)

Über diesen unveränderten technologisch geprägten Fokus hinaus wird im „Bundesbericht Energieforschung 2017“ (BMWi 2017b:30f) konstatiert, dass die dafür erforderliche Systemanalyse „in einem stetig komplexer werdenden Forschungsfeld agiert, beeinflusst durch technische, ökologische, wirtschaftliche, sozioökonomische und politische Faktoren, die auf das Gefüge einwirken.“ Zudem wird die „mit der Energiewende steigende Bedeutung sozioökonomischer Faktoren“ benannt, mit deren Hilfe „wertvolle Hinweise“ verbunden werden, um zu erkennen, „welche Technologien und Effizienzmaßnahmen sich bei den Nutzern durchsetzen könnten“. Allerdings kann die Gewichtung dieser Aspekte noch gesteigert werden.

Genau dieser Hintergrund der komplexer werdenden Energieforschung und ihre untrennbare Einbettung in „soziotechnische Gesamtsysteme“<sup>1</sup> stellen den zentralen methodischen und inhaltlichen Ausgangspunkt für diesen Bericht dar.

---

<sup>1</sup> Diese umfassen nach Geels (siehe Abschnitt 2.2) alle für eine Transformation relevanten Dimensionen (kulturell, politisch, sozial, ökonomisch und ökologisch etc.).

Ziel dieser Arbeiten ist es,

- das Thema „Systemintegration, -innovation und -transformation“ als quer liegendes „Technologiefeld“ 7.4 in den übergreifenden Teil der Technologiebewertung aufzunehmen und zu bewerten,
- daher eine eigene Methodik zur explorativen Bewertung des F&E-Bedarfs (siehe Kapitel 2) und diesbezüglich Definitionen für die Begriffe Systemintegration, -innovation und -transformation zu entwickeln sowie
- auf dieser Basis neue Anforderungen an und Bedarfe für die „systemische“ Energieforschung abzuleiten und zu ergänzen (siehe Kapitel 4 bzw. 4.3).

Als **Lesehinweis (how to read me)** sei darauf verwiesen, dass dieser Technologiebericht eine explorative Forschungsanstrengung widerspiegelt, die sich dem Untersuchungsgegenstand auf verschiedene Weise genähert hat. Aufgrund dieses – im Vergleich zu den restlichen Technologiefeldern – qualitativ anderen Technologiefeldes (vgl. Einleitung in Kapitel 2) werden unterschiedliche Abgrenzungen für Phasen, Ebenen und Forschungsbedarfe vorgenommen. Dies bedeutet keinen Widerspruch, jedoch sind die Strukturen zum Teil unterschiedlich und für den Leser, der diesen Prozess nicht begleitet hat, nicht immer ohne weiteres zu verstehen. Diese unterschiedlichen Strukturen wurden aber bewusst im Text gelassen, um die möglichen unterschiedlichen Herangehensweisen an „systemische“ Forschungsbedarfe zu illustrieren.

Daher folgen an dieser Stelle einige *Hinweise*, die der verbesserten Lesbarkeit dienen. In Kapitel 2.2 werden die *Multi-Level-Perspective (MLP) Phasen* dargestellt (siehe Abb. 2-1), die die Durchdringung einer neuen Technologie in das Regime beschreiben. Im gleichen Kapitel werden zudem F&E-Bedarfe nach den *MLP-Ebenen* gegliedert, u. a. um zwischen beeinflussbaren und nicht-beeinflussbaren Faktoren unterscheiden zu können. In Kapitel 3 werden dann zur Illustration die systemischen Forschungsbedarfe der zwei Technologiefelder „Wärmenetze“ und „Windenergie“ adressiert, die auf unterschiedliche Weise abgeleitet und dargestellt werden. Das erste Fallbeispiel rund um Wärmenetze (Kapitel 3.1) orientiert sich dabei an den kommenden drei *Transformationsphasen* der Energiewende (siehe Abb. 3-1, Abb. 3-4 und Abb. 4-1) und an den *Umsetzungsvoraussetzungen auf der Nachfrage- und Angebotsseite* sowie an *gesellschaftlichen Implikationen und Anreizmodellen*. Bei den Abb. 3-1 und Abb. 3-4 handelt es sich um eine Kombination der drei *MLP-Ebenen* mit den drei noch verbleibenden Transformationsphasen der Energiewende (d. h. die erste Energiewende-Phase ist schon erreicht bzw. abgeschlossen) anstatt der vier *MLP-Phasen*. Im zweiten Beispiel „Windenergie“ (Kapitel 3.2) orientieren sich die F&E-Bedarfe dagegen an den *MLP-Phasen* und an den Bereichen *Systemintegration, -innovation und -transformation* (siehe Kapitel 2.1). Das Kapitel 4.1 schließlich beschreibt die F&E-Ausrichtung an den *Transformationsphasen der Energiewende* (unter Beachtung neuer Forschungsformate). Als Fazit für den gesamten Bericht werden schließlich die F&E-Bedarfe für die *Systemintegration, -innovation und -transformation* abgeleitet (siehe Kapitel 4.3), die sich dann in der Zusammenfassung (Steckbrief) wiederfinden.

## 2 Beschreibung des Technologiefeldes

Das Technologiefeld „Systemintegration, -innovation und -transformation“ ist qualitativ anders als die anderen Technologiefelder dieses Projekts. Anstatt einer weiteren Technologie nimmt es die Bedingungen in den Blick, die notwendig sind, dass sich neue Technologien auf breiter Basis durchsetzen und systemverändernd wirken. Dafür muss es notwendigerweise über die Betrachtungen von einzelnen Technologien hinausgehen. Es muss auch über die Betrachtung des Energiesystems als Ganzes hinausgehen und weiterführende gesellschaftliche Faktoren miteinbeziehen. Besonders der letzte Aspekt erfordert es, einen Analyserahmen zu wählen, der über rein technische Innovationstheorien hinausgeht, denn letztlich ist die Energiewende mit ihrer Umstellung auf fluktuierende Energiequellen ein tiefgreifender, system- und auch gesellschaftsverändernder Prozess.

Die Notwendigkeit dieses Technologiefeldes wurde im Laufe des Vorhabens bei der Analyse der anderen Technologiefelder deutlich. Es trat immer stärker hervor, dass mit der stärkeren Durchdringung neuer Technologiefelder Aspekte an Gewicht gewinnen, deren Lösungen jenseits der jeweils einzelnen Technologiefelder zu verorten sind.

Insgesamt ist dieses Technologiefeld stärker prozessorientiert. Um es beschreiben zu können, werden zunächst die Begriffe definiert (Kapitel 2.1). Danach wird der methodische Ansatz dargelegt (Kapitel 2.2).

### 2.1 Definitionen von Systemintegration, -innovation und -transformation

Nachfolgend werden die drei Begriffe Systemintegration, Systeminnovation und Systemtransformation definiert. Dabei wird zunächst eine verallgemeinerte Definition gegeben und anschließend der Begriff auf das hier betrachtete Themenfeld „Energiewende“ angewendet. Die Grenzen zwischen den drei Systembegriffen sind fließend, sie bauen jedoch wie folgt aufeinander auf und lassen sich dabei folgendermaßen voneinander abgrenzen:

- 1 | Die *Systemintegration* erfolgt zu Beginn der Transformation und beinhaltet sowohl eine Anpassung neuer Technologien an das System als auch umgekehrt des Systems an (einzelne) Veränderungen.
- 2 | Die *Systeminnovation* resultiert dann im Zeitverlauf aus einer Reihe an Systemintegrationen und ist eine proaktive Aktion zur Veränderung des Systems.
- 3 | Die *Systemtransformation* ist abschließend zugleich Ziel, Gesamtprozess (inkl. gesellschaftlicher Fragen) und Resultat.

#### 2.1.1 Systemintegration

Der Begriff *Systemintegration* umfasst *allgemein* Maßnahmen und Instrumente zur erfolgreichen Implementierung von neuen (zusätzlichen) Technologien (z. B. Windkraftanlage) oder Technologiekomponenten (z. B. Generator) in ein bestehendes und in Betrieb befindliches technisches System. Dabei sind störende Rückwirkungen auf das System zu vermeiden bzw. zu begrenzen und die Stabilität des Systems ist zu bewahren bzw. zu verbessern. Aus Sicht sowohl des Technologie- als auch des betroffenen Systembetreibers sind dafür die Integrationskosten und aus volkswirtschaftlicher Sicht die langfristig resultierenden Gesamtkosten möglichst gering zu halten.

Neben dieser technisch-ökonomischen Dimension sind auch nicht-technische Aspekte wie z. B. gesellschaftliche, kulturelle, ökologische und rechtliche Aspekte zu beachten.

Unter *Energiesystemintegration* werden Maßnahmen verstanden, die von Marktteuren oder der Regulierungsinstanz ergriffen werden und einen Beitrag zur Optimierung des (räumlichen und zeitlichen) Zusammenspiels zwischen fluktuierender EE-Erzeugung (FEE), Last und Infrastruktur im Energiesystem leisten. Der Gesamtprozess der Integration besteht aus verschiedenen Einzelmaßnahmen, die der Energiesystemtransformation dienen sollen. Die Einzelmaßnahmen können an jeder Stelle des Energiesystems (Erzeugung, Transport, Verteilung, Verbrauch) sowohl innerhalb als auch gekoppelt zwischen den Sektoren (Haushalte, Industrie, Verkehr, Landwirtschaft) ergriffen werden. Sie können sowohl an zentralen als auch an dezentralen Stellen des Energiesystems erfolgen. Damit bezieht sich Integration auf Maßnahmen mit unmittelbarer Wirkung (auch wenn die Wirkung über Lebensdauern von Technologien hinaus anhalten kann), die außerdem räumlich beschränkt sein können. Sie grenzt sich damit von der Transformation ab, die den gesamten Wandel hin zu einem fundamental neuen Zustand bezeichnet.

*Beispiele* für Systemintegration aus dem Energiesektor:

- Maßnahmen und Instrumente zur Integration von (einzelnen) Energiewendetechnologien in das laufende Energieversorgungssystem, dazu gehören u. a. Anreize, Fördermaßnahmen, Standardisierungen und technische Regeln bezogen auf
  - erneuerbare Energieanlagen und Effizienztechniken,
  - ergänzende Technologien (enabler) wie z. B. Batteriespeicher, regelbare Ortsnetztransformatoren und Smart Meter,
  - neue Verbraucher bzw. Wandler wie z. B. Elektro-PKW und Power-to-X Anlagen (PtG, PtH, PtL...),
  - neue Betriebs- und Vermarktungsstrategien sowie Dienstleistungen

### 2.1.2 Systeminnovation

*Systeminnovation allgemein* beschreibt einen - mehr oder weniger radikalen - sozio-technischen Wandel in Systemkomponenten und in der gesamten Systemarchitektur, welcher drei Aspekte beinhaltet (Geels 2004:19f)<sup>2</sup>:

- 1 | Eine technologische Substitution mit der
  - a. Entstehung neuer Technologien
  - b. Verbreitung neuer Technologien und
  - c. Ablösung alter durch neue Technologien,
- 2 | Ko-evolutionäre Veränderungen, d. h. sich wechselseitig beeinflussende Anpassungen, im Benutzerverhalten (z. B. Routinen), in Regularien, industriellen Netzwerken, Infrastrukturen und kultureller Bedeutung und
- 3 | Die Entstehung neuer Funktionalitäten.

Technologische Systeminnovationen bestehen aus einer Vielzahl zueinander kompatibler Technologien, die komplementär zu einem Ganzen (einem System) integriert

<sup>2</sup>

Eigene Übersetzung (mit Ergänzungen)

werden, so dass ihre jeweiligen (Teil-)Funktionen das jeweils übergeordnete System funktionell ergänzen oder erweitern. Neben technologischen Systeminnovationen können zum Beispiel auch soziale, organisatorische und finanzwirtschaftliche Innovationen unterschieden werden (Wettengl 1999:16 ff.).

Wenn es gelingt, die notwendigen Komponenten in funktionierende Systemarchitekturen einzubinden, lassen sich aus Systeminnovationen wirtschaftlich tragfähige und gesellschaftlich akzeptierte Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle entwickeln. Systeminnovationen wirken organisations- und fachübergreifend und sind auf ein funktionierendes Zusammenwirken und auf die Akzeptanz unterschiedlicher Stakeholder entlang von Wertschöpfungsprozessen angewiesen (itt 2018).

Vor diesem Hintergrund wird eine *Systeminnovation im Bereich der Energiewende* durch folgende zusammenhängende Eigenschaften definiert bzw. gekennzeichnet: Durch die Weiterentwicklung bzw. Verbreitung von (innovativen) Energiewendetechnologien entstehen neue Markt-Strategien, neue einschlägige Akteure und Dienstleistungen, neue Versorgungsprodukte- bzw. -portfolios, neue technologieübergreifende Rahmenbedingungen sowie Anpassungen und Erweiterungen der bestehenden energietechnischen Infrastrukturen, so dass letztlich die bestehenden fossilen, nicht nachhaltigen Technologien und Strukturen zunehmend verdrängt werden.

*Beispiel Wind:* Immer mehr und größere, leistungsstärkere WEA führten dazu, dass die WEA ferngesteuert betrieben und geregelt werden, Einspeisemanagement und Entschädigungen eingeführt wurden, die WEA heute zur Netzstabilität beitragen und Fehler durchfahren können. Gleichzeitig wurden die Wetterprognosen verbessert, das Stromnetz massiv optimiert und ausgebaut (u. a. durch Freileitungsmonitoring). WEA werden mittlerweile fast vollständig direkt vermarktet und werden künftig verstärkt Regelleistung und andere Systemdienstleistungen übernehmen (müssen).

*Weitere Beispiele* für Systeminnovation aus dem Energiesektor:

- Elektro-Mobilität in Kombination mit autonomem Fahren oder V2G
- Virtuelle Kraftwerke zur Erbringung von Systemdienstleistungen
- Sektorkopplung (Power-to-X)
- LowEx-Konzepte<sup>3</sup>
- Integrales Bauen

### 2.1.3 Systemtransformation

Der Begriff *Systemtransformation* beschreibt *allgemein* die Prozesse und Übergänge von einem bestehenden und laufenden sozio-technischen System in ein neues System, welches sich grundlegend von dem vorigen System unterscheidet. Dabei sind unterschiedliche Phasen (siehe Kapitel 4.1) und Geschwindigkeiten sowohl für das

---

<sup>3</sup>

Als „Low-Ex“-Systeme werden Systeme für das Heizen und Kühlen von Gebäuden bezeichnet, die so ausgelegt sind, dass sie mit Energiequellen auf einem niedrigen Temperatur- und somit Exergie-Niveau versorgt werden können. Als „Exergie“ bezeichnet man in der Thermodynamik denjenigen (von den Umgebungsbedingungen abhängigen und hochwertigen) Anteil der Energie, der zur Abgabe von Arbeit in der Lage ist. Beispiele für niedere exergetische Energieformen sind Wärmequellen auf einem niedrigen Temperaturniveau wie oberflächennahe Erdwärme, Umgebungswärme, (Niedertemperatur-)Solarwärme sowie Abwärme aus Industrieprozessen oder KWK-Anlagen.



Gesamtsystem als auch für relevante Teilsysteme zu unterscheiden. Treiber für eine Systemtransformation können sowohl positiver bzw. zielorientierter (z. B. Innovationen, Verbesserung in Effizienz oder Komfort) als auch negativer bzw. problemorientierter Natur (Druck zur Veränderung z. B. durch soziales Unrecht oder eklatante Umweltschäden) sein. Die Transformation ist ein Strukturwandel, der das Zusammenspiel institutioneller, kultureller, technologischer, ökonomischer und ökologischer Dimensionen eines Systems verändert und in der Lage ist, neue Entwicklungspfade freizusetzen.

Die Energiesystemtransformation ist daher ein *soziotechnischer Prozess*, der nicht nur den technologischen, sondern *auch den organisatorischen und gesellschaftlichen Wandel umfasst*, der mit dem langfristigen Umbau und der Erweiterung des Energieversorgungssystems einhergeht.

Unter *Energiesystemtransformation* wird der komplexe Gesamtprozess einer kontinuierlichen und langfristig angelegten Umgestaltung des überwiegend fossil dominierten Energieversorgungssystems hin zu einem energieeffizienten Energiesystem mit hohen Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien verstanden. Diese Transformation betrifft unterschiedliche Sektoren (Haushalte, Industrie, Verkehr, Landwirtschaft) bzw. Bereiche (Wärme, Strom, Mobilität). Die dortigen Umgestaltungsprozesse können in unterschiedlichen Phasen verlaufen und sind nicht notwendigerweise synchron zueinander. Die Strom- und Wärmeversorgung wird sich zum Beispiel von dem heutigen, überwiegend lastgeführten System mit Großanlagen (unidirektionalen Lastflüssen) und geringer Kopplung zwischen den Verbrauchssektoren zu einem stärker erzeugungsgeführten System aus vermehrt dezentralen Anlagen (mit häufigeren bidirektionalen Lastflüssen) und einer hohen intersektoralen Kopplung wandeln.

Im Zuge der Transformation steigen die Notwendigkeit und der Einsatz von verschiedenen Flexibilitätsoptionen (zeitlichen bzw. räumlichen Ausgleichsoptionen) sowie von strombasierten Anwendungen und Energieeffizienz. Die Transformation besteht aus einer Vielzahl von sozio-technischen Entwicklungspfaden mit mehr oder weniger positiven Beiträgen zur Gesamttransformation. Die Energiesystemtransformation lässt sich in systemrelevante Transformationsphasen (siehe Kapitel 4.1) unterteilen, die aufgrund der unterschiedlichen Wirkungen auf die Gesamttransformation eine wichtige Rolle für die kontinuierliche Gestaltung und Steuerung der Transformation spielen.

*Beispiele* für Teil-Systemtransformation aus dem Energiesektor:

- Atom- und Kohleausstieg
- Industrie 4.0
- Treibhausgasneutraler Industrie- und Verkehrssektor
- Digitalisierung der Energiewende

## 2.2 Energiewende in der Multi-Level-Perspective (MLP)

### 2.2.1 Energiewende als Transformationsprozess

Die Energiewende stellt eine normative *Transformation* der Energieversorgung dar, weg von nuklearen und fossilen Primärenergieträgern, hin zu erneuerbaren Primär-

energieträgern und kohlenstoffneutralen Endenergieträgern. Sie wird dabei durch eine Reihe weiterer Anforderungen und Ziele bezüglich Effizienzsteigerung und Energieeinsparung und - allgemeiner - hinsichtlich Versorgungssicherheit und „Bezahlbarkeit“ flankiert.

Der *Gegenstand* dieser Transformation ist das Energieversorgungssystem als Ganzes, welches wiederum aus mehreren miteinander wechselwirkenden Teil- und Subsystemen (z. B. Industriesektor und -prozesse) besteht. Es umfasst neben den verschiedenen technischen Dimensionen, die bisher im Vordergrund der Energieforschung stehen, auch die ökonomischen, ökologischen, politischen, rechtlichen, sozialen und kulturellen Dimensionen. Diese wiederum bestehen jeweils aus einer Vielzahl an „Teilgegenständen“ wie z. B. Kraftwerke, Energieleitungen, Energie- und Finanzmärkte, Energieunternehmen und -kunden, Behörden, Gesetze und Verordnungen etc. Das Energiesystem ist letztlich untrennbar mit der Gesellschaft und Volkswirtschaft verbunden.

Um diese soziotechnischen Eigenschaften und Verzahnungen im Verlauf der Energiewende und der unterstützenden Forschung möglichst ganzheitlich abbilden, analysieren und bewerten zu können, bedarf es einer geeigneten Methode. Hierzu bietet sich besonders die *Multi-Level-Perspective (MLP)* nach Geels als methodischer Rahmen an (vgl. Geels 2018). Diese bezieht sich im Unterschied zu gängigen Innovationsmethoden<sup>4</sup> nicht nur auf technische Innovationen und (neue) Produkte, sondern auf soziotechnische Systeme und deren Verflechtungen zwischen technologischen, ökonomischen, politischen und kulturellen Veränderungsprozessen (Schrape 2014:1). Sie unterscheidet dabei für Transformationen von Systemen zwischen den folgenden drei Ebenen, die stetig miteinander wechselwirken (siehe Abb. 2-1):

- **Nischen-Ebene** (unten): Hier beginnen die „radikalen“ Innovationen, die letztlich zu einer Änderung des Regimes und zur Transformation des Systems beitragen (können). Sie werden in der Regel zunächst von einer kleinen Anzahl an Akteuren unterhalb der allgemeinen Wahrnehmungsschwelle entwickelt, bei weitgehender Entkopplung von Marktmechanismen und unterstützt durch Fördermaßnahmen (Schrape 2014). Sie unterscheiden sich deutlich von den vorherrschenden Technologien und Eigenschaften und häufig auch Akteuren des Systems insbesondere auf Regime- sowie auf Landscape-Ebene. Die Innovationen wechselwirken stark mit der Regime-Ebene, werden verändert bzw. ändern im Erfolgsfall die Rahmenbedingungen ihrerseits. Langfristig können aus Nischen-Innovationen Trends erwachsen, die auch die Landscape-Ebene beeinflussen.
- **Regime-Ebene** (Mitte): Die soziotechnische Regimeebene stellt den aktuellen, relativ stabilen Zustand der vorherrschenden Rahmenbedingungen dar wie z. B. Akteurs-, Markt- und Nutzungskonstellationen sowie technische und rechtliche Regeln und politische Ziele. In diesen verschiedenen Bereichen finden gleichwohl stetig Anpassungen und Veränderungen statt. Diese sind aber im Vergleich zur Nischenebene nur graduell.

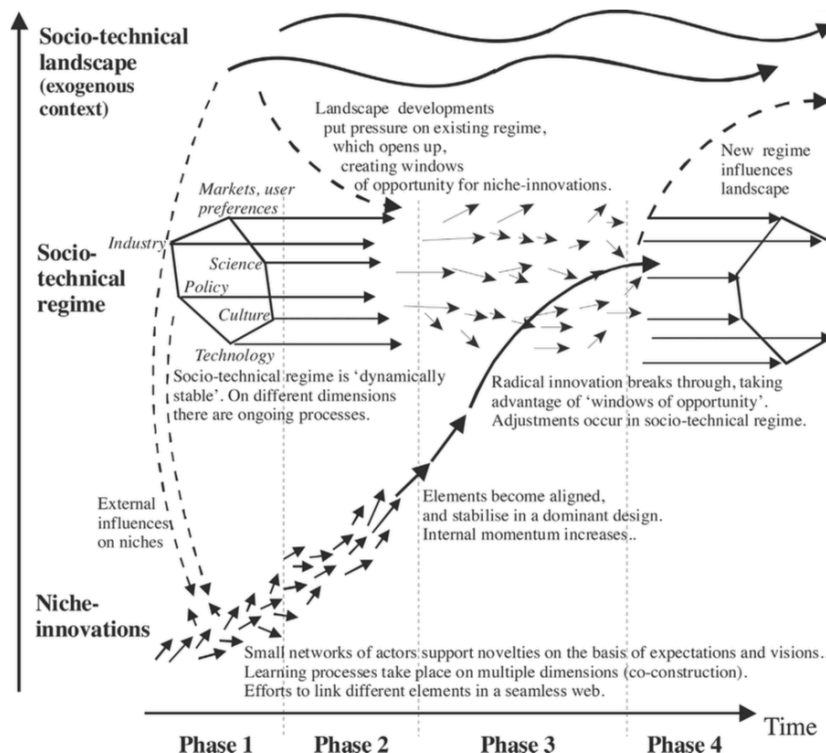
---

<sup>4</sup>

Zum Beispiel Analogiemethode, Brainstorming, Funktionsanalyse, Trendforschung (siehe <http://www.innovationsmethoden.info/methoden>)



- **Landscape-Ebene (oben):** Auf dieser Ebene sind die übergreifenden Rahmenbedingungen, Entwicklungen und Megatrends verortet, auf welche die beiden vorigen Ebenen in der Regel nur wenig Einfluss haben. Diese Rahmenbedingungen können sich entweder nur langsam ändern (wie z. B. Demographie und geographische bzw. räumliche Strukturen) oder recht schnell (teilweise schockartig / disruptiv) wie z. B. Katastrophen (z. B. Kernkraftwerks-GAU in Fukushima), Kriege, Krisen.



**Abb. 2-1 Multi-Level-Perspective bezogen auf soziotechnische Übergänge**

Quelle: Geels (2018)

Die grundlegende Idee hinter der MLP ist, dass Übergänge bzw. Transformationen (wie die Energiewende) zwischen zwei Zuständen durch Ausrichtung bzw. Interaktion von Prozessen auf allen drei Ebenen entstehen bzw. beeinflusst werden (Rogge et al. 2015:2; Geels 2018). Dabei können vier (stilisierte) Phasen unterschieden werden: In der ersten Phase („predevelopment“) entstehen radikale Innovationen in Nischen. In der zweiten Phase setzt sich ein dominantes Design in einem Nischenmarkt durch („early market niche“) bevor es in der dritten Phase („breakthrough“) in Konkurrenz zum Regime tritt. In der vierten Phase („Stabilization of new regime“) erfolgt schließlich die Umstellung auf das neue Regime (Geels et al. 2017:465-466; Geels 2018:225).

Ein solcher Wandel erscheint daher als Ergebnis ko-evolutionärer, d. h. sich wechselseitig beeinflussender struktureller Dynamiken auf allen drei Ebenen. Auf Nischen-ebene werden fortlaufend Innovationen in verschiedenen Varianten entwickelt, die sich entweder durch gegenseitige Ausrichtung verdichten (stabilisieren) und dann später auch auf der Regimeebene durchsetzen können (bottom-up Wandel) oder sich

wieder „verflüchtigen“. Zusätzlich kann es auch durch sich akkumulierende Entwicklungen z. B. durch verschiedene sich ergänzende Klimaschutzpolitiken auf der Landscape-Ebene (top-down Wandel) sowie durch eigene (gezielte) Initiativen auf der Regimeebene (proaktiver Wandel) zur Transformation der Regimeebene kommen (Schrape 2014).

### **2.2.2 Ansatzpunkte für die Anwendung der MLP auf die Energieforschung zur Energiewende**

Die zuvor kurz eingeführte MLP ergänzt und erweitert die Innovationsforschung, insbesondere die im Bundesbericht zur Energieforschung genannten politischen und sozioökonomischen Aspekte (siehe oben) um entsprechende Narrative (sinnstiftende Erzählungen). Diese sind zunächst für eine bessere Berücksichtigung der Regimeebene und integrale Abbildung des Energiesystemzustandes wichtig. Darüber hinaus bringt die MLP gedanklich zusätzlich stärker die übergreifenden Entwicklungen der Landscape-Ebene ein, die in Systemanalysen bisher hauptsächlich exogen und zum Teil nur qualitativ berücksichtigt werden. Dazu gehören zum einen primär sogenannte strukturelle Eckdaten wie demographische Entwicklungen, Gebäude- und PKW-Bestände, Energie- und CO<sub>2</sub>-Preise sowie Ziele für THG-Reduktionen bzw. EE-Anteile. Zum anderen werden zugrundeliegende (bestehende) politische Rahmenbedingungen wie z. B. EEG, Strommärkte und Emissionshandel benannt. Diese gehen zum Teil explizit in Modelllogiken und -rechnungen ein, zum Teil bilden sie den deskriptiven Rahmen zur Einordnung von Annahmen und Ergebnissen.

Dabei ist zu beachten, dass die MLP selbst ein qualitatives, empirisches und quasi frei gestaltbares Analyseinstrument und keine wohldefinierte Methode ist. Dies macht es schwer, sie methodisch gut in modellgestützte und systemanalytische Forschung zur Energiewende zu integrieren.

Doch auf welche Art und Weise kann die MLP dann künftig zur Ergänzung und Verbesserung der systemischen Energieforschung beitragen? Hierzu seien zunächst rückblickend und exemplarisch Entwicklungen und Ereignisse im Bereich erneuerbarer Energien und Photovoltaik (PV) genannt, die durch die bisherige Energieforschung nicht ausreichend berücksichtigt wurden.

- Die Einführung der kostendeckenden Vergütung für PV-Strom (*Regimeebene*) hat neben dem gewährten Einspeisevorrang zu einem länger anhaltenden, unerwartet starken Market Pull durch Bürger (!) und zu neuen institutionellen Investoren geführt. In der Folge wurden der Zubau sowie die Kosten- und Preissenkungen (positive Rückkopplung) sowohl in der Politik als auch in der Wissenschaft (Szenarien) stetig und signifikant unterschätzt.
- Diese Entwicklung führte im Kontext der stark öffentlichkeitswirksam geführten Kostendiskussion (EEG-Umlage) wiederum zu anhaltenden Unsicherheiten bei der Novellierung des EEG und letztlich zu politischen Gegenmaßnahmen, die zu einem starken Einbruch bei der heimischen Marktentwicklung und damit bei den zuvor noch stark gestützten Unternehmen führte (Regimeebene). Dies führte zu der Situation, dass - nachdem die Boom-Zeiten in der teuren Anfangsphase überwunden wurden - jetzt trotz extrem gesunkener Anlagenpreise nur noch ein relativ geringer Nettozubau zu verzeichnen ist.

- Verschärft wurde diese Entwicklung durch die kurzfristige Entscheidung Chinas auf der *Landscape-Ebene*, in kurzer Zeit mittels konkurrenzlos günstiger PV-Module und mit staatlicher Unterstützung „zum Weltmarktführer bei PV“ zu werden. Eine weitere Folge waren u. a. europäische Strafzölle auf chinesische Module und letztlich mehr Unsicherheiten bei den anzulegenden Rahmenbedingungen für die weitere Entwicklung des hiesigen PV-Marktes.
- Die Forschung und Entwicklung von effizienteren und kostengünstigeren PV-Systemen wurde als Folge des EEG-bedingten Markterfolgs zunehmend durch die Firmen selbst finanziert. Dies führte zu einer Verlagerung von staatlicher hin zu betrieblicher Energieforschung.

Vor diesem Hintergrund (*lessons learnt*) besteht die Herausforderung darin, den Nutzen der MLP als soziotechnisches ex-post Analyseinstrument für die ex-ante Energieforschung gut nutzbar zu machen. Dazu bieten z. B. die folgenden Ansätze wichtige Ergänzungen zur bisherigen Energieforschung:

### Regime-Analysen

- Bestimmung und Bewertung des aktuellen Regimes, das für das jeweilige Forschungsthema bzw. die Energiewende insgesamt ausschlaggebend ist, sowohl bezogen auf die Widerstände als auch auf die gezielten Destabilisierungsmöglichkeiten um (System-)Innovationen zum Durchbruch zu verhelfen und damit zu einem nächsten „stabilen“ Regime überzugehen. Dies ist entlang der Transformationsphasen zu wiederholen. (Proaktiver Wandel)
- Was sind die Transformationskapazitäten<sup>5</sup> von (neuen) Technologien für die Energiewende? Welche Technologien spielen in beiden Welten (heute und langfristig) eine zentrale Rolle? Welche Technologiefelder wie z. B. Sektorkopplung und Power-to-X beinhalten sich widerstreitende Potenziale bzw. Strategien (z. B. nationale Erforschung für Technologieexport und damit verbunden neue Importabhängigkeiten von z. B. EE-strombasierten Kraftstoffen aus sweet spots<sup>6</sup>)
- Systematische (übergreifende) und / oder technologiespezifische (begleitende) Reflexions-Analysen des gesamten Energieversorgungssystems via MLP bezogen auf Lock-Ins sowie Spannungen und Brüche des Systems.
- Pfadanalysen im Sinne von Roadmaps, in denen skizziert wird, wann, wer, unter welchen Bedingungen, welche Entscheidungen treffen muss, um gesetzte Ziele mit hoher Wahrscheinlichkeit erreichen zu können (inkl. Risikoanalysen, siehe unten).

<sup>5</sup> Das bedeutet, wie stark und wie schnell können Technologien bzw. Innovationen das Energiesystem verändern bzw. transformieren?

<sup>6</sup> Mit dem Begriff *Sweet Spot*, *Sweetspot* oder *Sweet Area* wird in unterschiedlichen Themengebieten eine Art effektive Zone bezeichnet. Wenn sich etwas im Sweetspot befindet, hat es bzw. erhält es die optimale Wirkung. Mögliche freie Übersetzungen sind *optimaler Punkt*, *idealer Punkt* oder *optimaler Bereich/Region*. ([https://de.wikipedia.org/wiki/Sweet\\_Spot](https://de.wikipedia.org/wiki/Sweet_Spot))

## Landscape-Analysen

- Welche externen, exogenen Entwicklungen sind über die bekannten relevanten Ereignisse und „Megatrends“ hinaus denkbar und welche Wirkungen auf Regime und Nischen können sie entfalten? Wie können solche Entwicklungen z. B. in Modellen endogenisiert werden? Zum Beispiel die Ergebnisse der COP 21 in Paris.
- Risikoanalysen u. a. zu *black swans*<sup>8</sup>

## Nischen-Analysen

- Welche „Ausrichtungen“ von Innovationen waren warum, wie und wann erfolgreich und welche nicht? Welche windows-of-opportunities werden wann benötigt bzw. wie können sie gezielt geöffnet und offen gehalten werden?
- Technologiespezifische Analyse möglicher windows-of-opportunities, um sich öffnende Zeitfenster zum Sprung von der Nische zum Trend bestmöglich nutzen zu können
- Komplementär begleitender Ansatz des Market Pull zum Technology Push, wenn deutlich wird, dass es notwendige Innovationen nicht aus eigener Kraft aus der Nische heraus schaffen sich zu entwickeln (Hilfsmittel: MLP)
- Wie entstehen Systeminnovationen und wie können sie gefördert bzw. vorangebracht werden? Welche Wirkungen haben sie im Vergleich zu Einzel-Innovationen? Welche sind künftig zu erwarten bzw. werden benötigt?
- Mehr experimentelle bzw. inter- und transdisziplinäre Forschung (siehe Kapitel 4.2) im Sinne von (zeitnaher) Umsetzungsforschung

Bei der Anwendung von MLP im oben genannten Sinne ist gemäß Geels (2018) zu beachten, dass

- sich die soziotechnischen Systeme (Zustände), die aus einer Vielzahl von verschiedenen und koevolutionären Elementen und ihren gegenseitigen Ausrichtungen bestehen, über einen längeren Zeitraum heraus bilden. Dies führt (zunächst) zu (systeminhärenten) Pfadabhängigkeiten und zu Widerständen gegenüber Änderungen des Systems durch etablierte Akteure und Regeln, die erst zu überwinden sind.
- Daraus folgt, dass nicht jede Innovation in den Nischen zu Änderungen des Regimes führen muss. Manchmal ist das Beharrungsvermögen des Regimes zu groß (zu stabil). Andersherum können Änderungen auf der Landscape-Ebene Druck auf das Regime ausüben und Innovationen aus den Nischen zum Durchbruch verhelfen. Somit kann die Kombination der Initialzündungen aus bottom-up, top-down und pro-aktiven Veränderungen entscheidend sein.

<sup>7</sup> Beispiele für unterschätzte und schwer vorhersehbare „singuläre“ soziopolitische (radikale) Veränderungen (Disruptionen) sind z. B. Fukushima, Finanzkrise 2008, Explosion eines CNG PKW, anhaltende Zinskrise, Diesel-Betrugsskandal, Brexit und Flüchtlingskrise

<sup>8</sup> Der „schwarze Schwan“ bezeichnet seltene und höchst unwahrscheinliche Ereignisse (Ausreißer), die extreme Konsequenzen haben und die Neigung der Menschen im Nachhinein einfache und verständliche Erklärungen für diese Ereignisse zu finden  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Der\\_Schwarze\\_Schwan\\_\(Nassim\\_Nicholas\\_Taleb\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Der_Schwarze_Schwan_(Nassim_Nicholas_Taleb))

- Bei einer Rekonfiguration des betrachteten Systems bezogen auf Regime, Nischen und Landscape ggf. auch eine Anpassung der MLP Analysen vorzunehmen ist und dass dabei verschiedene Änderungsgeschwindigkeiten und -grade zu beachten sind.

### 3 Ableitung von Forschungsbedarf am Beispiel von zwei ausgewählten Technologiefeldern

In diesem Kapitel wird die MLP aus Kapitel 2.2 exemplarisch auf die zwei konkreten Technologiefelder „Windenergie“ und „Wärmenetze“ angewendet. Nachdem im vorigen Kapitel das allgemeine Konzept der MLP eingeführt und auf die Energiewende angewendet wurde, ist es jetzt das Ziel, die MLP anhand der Fallbeispiele besser greifbar zu machen und konkretere Forschungsbedarfe abzuleiten. Abb. 3-1 ordnet die Bedingungen, Innovationen, F&E-Bedarfe und Zielzustände in den kommenden Transformationsphasen (siehe Kapitel 4.1) ein.

Bei der Analyse der F&E-Bedarfe ist zu beachten, dass es *nicht* darum geht, die in den jeweiligen Forschungsberichten zu den Technologiefeldern bereits gemachten Aussagen zu wiederholen. Ziel ist es vielmehr, *komplementäre* F&E-Bedarfe zu ermitteln, die zwar relevant für das Technologiefeld sind, deren Lösung aber jenseits dessen liegt.

Im Ergebnis wird somit einerseits ein allgemeiner, technologieübergreifender System-Forschungsbedarf abgeleitet (siehe. Kapitel 4). Zusätzlich wird ganz konkret beispielhaft für die beiden Technologiefelder Wind und Wärmenetze spezifischer System-Forschungsbedarf ermittelt. Die übrigen 28 Technologiefelder in der gleichen Detailtiefe zu untersuchen, konnte im Rahmen dieser Analyse nicht vorgenommen werden. Dies könnte Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten sein.

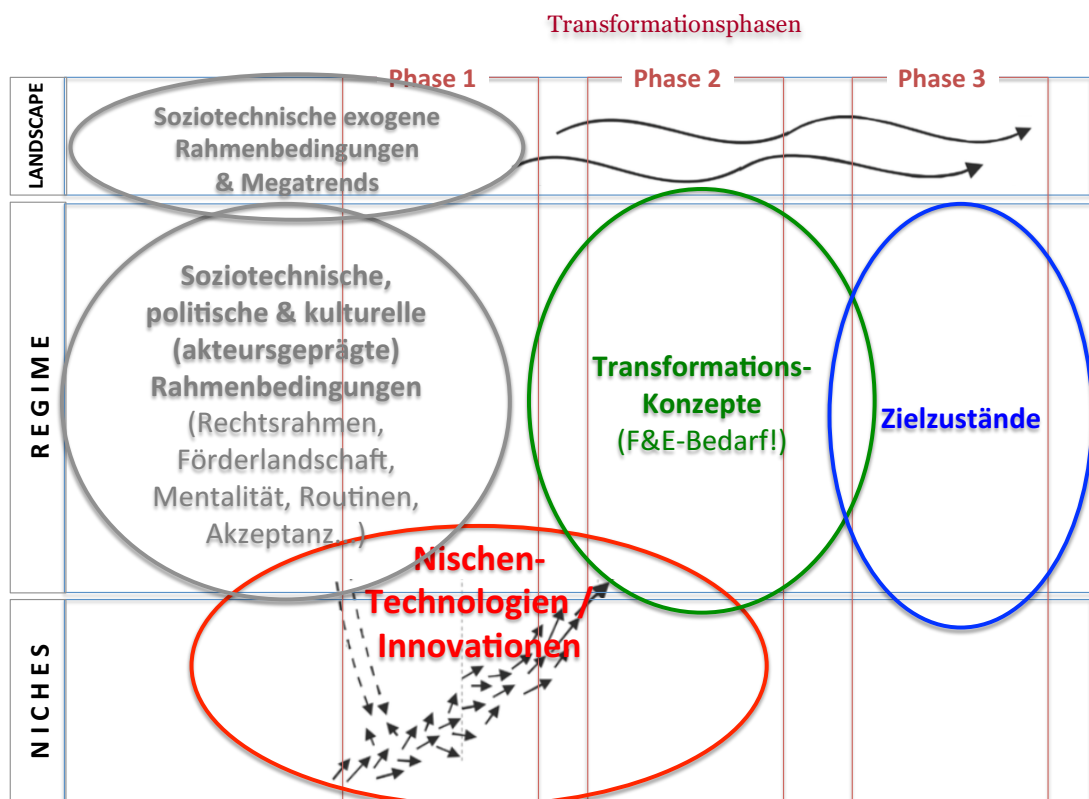


Abb. 3-1 Allgemeine Darstellung der MLP-Ebenen (als Basis für die folgenden Fallanalysen)

Bemerkung: Diese Darstellung orientiert sich an den kommenden drei Transformationsphasen (vgl. Abb. 4-2) und nicht an den vier MLP-Phasen für eine Transformation (vgl. Abb. 4-2). Bitte den Lesehinweis auf Seite 11 beachten!

### 3.1 „Systemischer“ F&E-Bedarf im Technologiefeld Wärmenetze

Die Energiewende in Deutschland hat in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Beim Ausbau der erneuerbaren Energien im Wärmesektor fallen die Erfolge – insbesondere im Vergleich zum Stromsektor – jedoch bisher gering aus. Eine besondere Chance, aber auch eine besondere Herausforderung für die Energiewende stellen insbesondere leitungsgebundene Wärmeversorgungsstrukturen dar. Wärmenetze bieten eine Reihe von Vorteilen bei der Umsetzung der Energiewende im Gebäudebereich, insbesondere durch die Möglichkeit, erneuerbare Energien, Abwärme, Kraft-Wärme- (Kälte)-Kopplung und Wärmespeicher in die Wärmeversorgung zu integrieren. Gleichzeitig bietet die netzgebundene Versorgung die Möglichkeit, Wärmequellen (z. B. industrielle oder kommunale Abwärme) und Wärmesenken (z. B. Wohnquartiere) zusammenzuführen. (Schüwer 2017)

Aufgrund ihrer hohen Kapitalbindung bei gleichzeitig hoher Lebensdauer müssen bei Wärmenetz-Infrastrukturen frühzeitig die richtigen Weichenstellungen in Richtung Energiewende vorgenommen werden. Eine Vielzahl von Akteuren wie Stadtwerke und Energieversorger, Planer und Handwerker bis hin zur Immobilienwirtschaft stehen vor der Schwierigkeit, einen langfristig kompatiblen Pfad in Richtung Klimaschutz und Energiewende einzuleiten.

Eine weitere Besonderheit von Wärmenetzen ist die disperse Akteurslandschaft auf der Nachfrageseite, wo einzelne Gebäudebesitzer über die Wahl ihrer Heizungstechnologie und somit - in der Gesamtheit - über den Fernwärme-Anschlussgrad entscheiden und die Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzprojekten auf diese Weise in hohem Maße mitbestimmen.

Die Versorgungssituation ist geprägt durch eine Vielfalt an Gebäudetypen, Baualtersklassen, Sanierungsstandards und Besitzverhältnissen auf der Nachfrageseite und (konkurrierenden) Einzel-Heizungstechnologien auf der Angebotsseite. Aus der Tatsache, dass Wärmenetze natürliche Monopole darstellen, ergibt sich die Notwendigkeit staatlicher Regulierung.

#### 3.1.1 Ausgangszustand

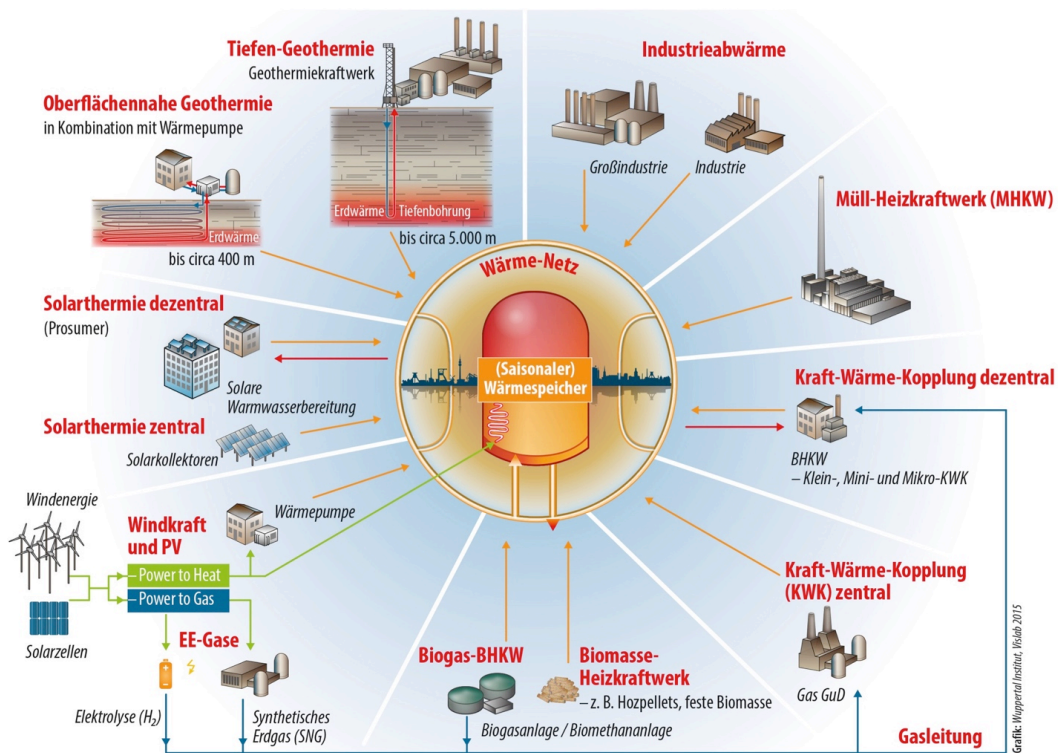
Einerseits werden heutige Wärmenetze (Stand 2016) in Deutschland bereits zu 83 % mit Wärme aus der Effizienztechnologie Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gespeist. Andererseits ist jedoch der Anteil der eingespeisten industriellen Abwärme mit nur 2 % sehr gering. (AGFW 2017:9) Ferner dominieren bei der KWK-Wärmeerzeugung mit über 84 % die fossilen Energieträger Erdgas, Steinkohle und Braunkohle mit ihren relativ hohen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Als erneuerbare Energien (EE) werden bislang lediglich Biomasse (6 %) und (teilweise erneuerbarer) Müll (< 11 %) eingesetzt (AGFW 2017:22). Ferner weisen Fernwärmenetze ein hohes Temperaturniveau auf, welches zu einem relativ hohen Wärmeverluste (ca. 14 %) nach sich zieht und zum anderen erschwert, die großen brachliegenden Potenziale für CO<sub>2</sub>-arme Wärmequellen (EE und Niedertemperatur-Abwärme) nutzbar zu machen.

#### 3.1.2 Zielzustand

Langfristiges Ziel der Bundesregierung ist der treibhausgasneutrale Gebäudebestand im Jahr 2050. Dieses Ziel kann durch die Kombination nachfrageseitiger Effizienz-



maßnahmen auf der Gebäudeseite (Dämmung, Lüftung mit Wärmerückgewinnung, effiziente Heizungstechnologie) und angebotsseitiger CO<sub>2</sub>-armer Energieträger (grüner Strom, grünes Gas und grüne Fernwärme) erreicht werden. Um „Grüne Fernwärme“ zu realisieren, müssen zukünftige Wärmenetze zu einem Sammler einer Vielzahl zukunftsfähiger Wärmequellen wie erneuerbare Energien (Biomasse und Biogas, Geothermie, Umgebungswärme, Solarenergie), sowie industrieller und kommunaler Abwärme ausgebaut werden. Zu der bereits etablierten Sektorkopplungstechnologie KWK (zentral und dezentral) kommen in Zukunft verstärkt auf erneuerbarer Stromerzeugung basierende Power-to-Heat- (Wärmepumpe und Elektrodenkessel) sowie Power-to-Gas-Lösungen (H<sub>2</sub>, synthetisches Methan) hinzu. Zentraler Baustein eines zukünftigen Wärmenetzes ist ein großer Wärmespeicher, der einen zeitlichen (stündlichen bis saisonalen) Ausgleich der dargebotsabhängigen erneuerbaren Energiequellen mit dem Wärmelastprofil ermöglicht.



**Abb. 3-2 Das Wärmenetz als Sammler und Lieferant für eine Vielfalt zukunftsfähiger Versorgungsoptionen**

Quelle: eigene Darstellung

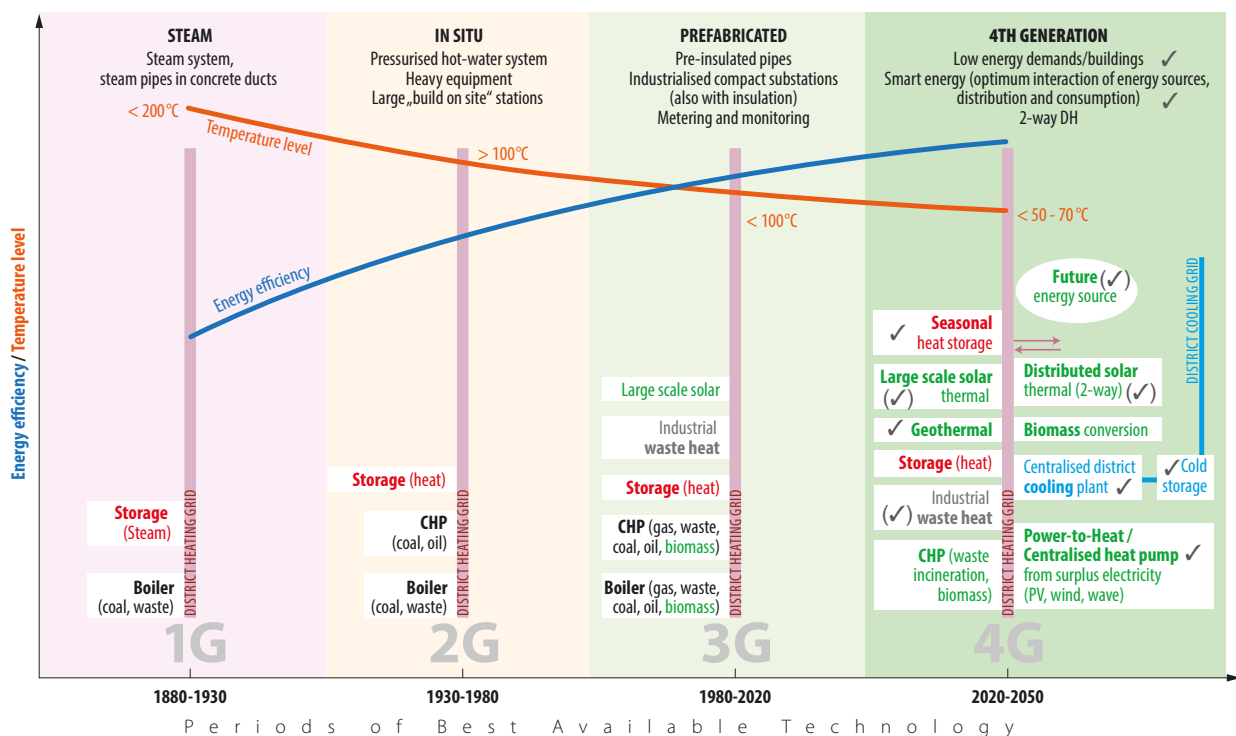
### 3.1.3 Systemtransformation

Um den oben beschriebenen Zielzustand zu erreichen, sind in Bezug auf Wärmenetze folgende Entwicklungen und Anpassungen erforderlich, die in Abb. 3-3 auf der Zeitachse skizziert sind:

- Erhöhung der Anteile erneuerbarer Wärme (aus Solarstrahlung, Biomasse-, Umgebungs- und Geothermiewärme, PtG und PtH aus erneuerbarem Strom)
- Erhöhung der KWK-Anteile mit CO<sub>2</sub>-armen Energieträgern (Biomasse, Biogas, Abfälle, Geothermie, Erdgas, synthetische Gase)



- Absenkung der Netztemperaturen (Vorlauf und Rücklauf) bis hin zu LowEx-Konzepten (z. B. kalte Nahwärme, Fernwärme-Rücklaufeinbindung, Mehrstufen-Temperaturbereitstellung) als Voraussetzung zur Hebung der Niedertemperatur-Wärmepotenziale
- Ambitionierte energetische Sanierung von Gebäuden und insbesondere von Quartieren, um eine LowEx-Wärmeversorgung zu ermöglichen
- Absenkung der Wärmenetzverluste
- Umrüstung Dampf- zu Wassernetzen
- Wärme-Kälte-Kopplung („Wärmeschaukel“) durch Integration von Kältenetzen und Kälteanwendungen
- Integration großer (Tages- und saisonaler) Speicher
- Aufbrechen großer (FW-)Netze in dezentralere Einheiten (Subnetze)
- Zunehmende Bedeutung industrieller und kommunaler Abwärme und Wärme aus Müllheiz(kraft)werken
- Weiterentwicklung von Anlagen zu Latentwärmetransporten und zu thermo-chemischen Kaltnetzen
- Zunehmende Digitalisierung / Smart Energy
- Zunehmende Verzahnung und Wechselwirkung zwischen Erzeuger, Speicher und Nachfrager.



**Abb. 3-3 Modell der vier Transformationsphasen (Generationen) für Wärmenetze (Haken = LowEx-fähige Technologien und Konzepte)**

Bemerkung: Diese vier Phasen bzw. Generationen sind weder zwangsläufig identisch mit den vier MLP-Phasen (vgl. Abb. 2-1) noch mit den kommenden drei Transformationsphasen (vgl. Abb. 4-2), sondern sie grenzen sich durch die zunehmende Vielfalt an Technologien, der steigenden Effizienz, der sinkenden Temperaturen und weiterer Charakteristika ab. Bitte den Lesehinweis auf Seite 11 beachten!

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Lund et al. (2014)

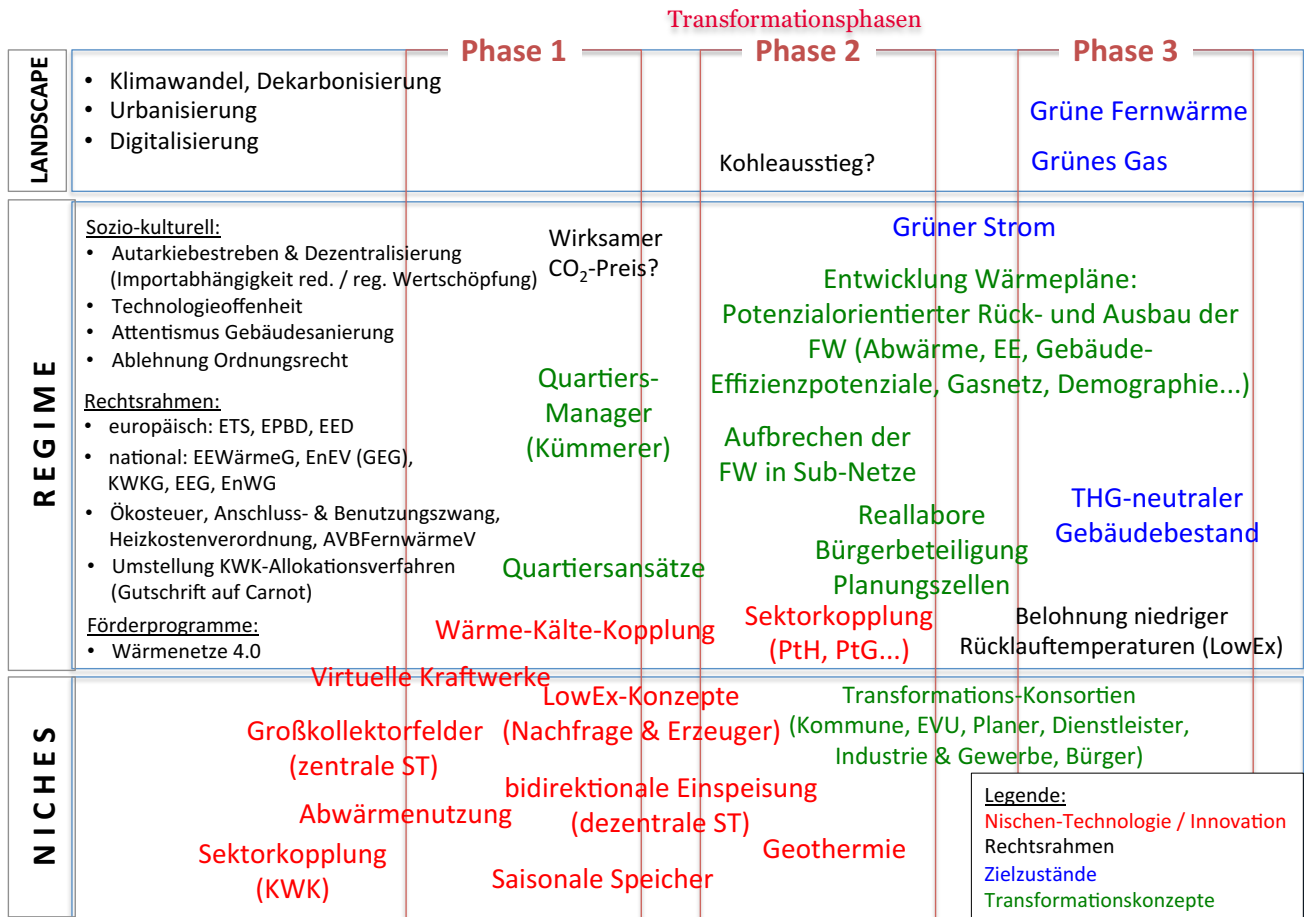
In Tab. 3-1 sind beispielhaft einige Wärmenetz-relevante Nischen-(System-)Innovationen, ihre Treiber und Akteure aufgeführt.

**Tab. 3-1 Beispiele für Wärmenetz-relevante Nischen-(System-)Innovationen, ihre Treiber und Akteure**

Nischen-Entwicklung	Treiber / Lösungsansatz / Idee	Begünstigende Faktoren	Zentrale Akteure
Anschluss über Infrastrukturkanal	Hohe Anschlusskosten für konventionelle Technologie verhindert FW-Anschluss (im Neubau)	Bauboom (Neubausiedlungen)	Ingenieurbüros / Planer / Hersteller
Zentrale Solarthermie-Einspeisung	FEE-Boom (Wind & PV) → Stromerzeugung aus KWK-Anlagen im Sommer zunehmend unwirtschaftlich → Solarthermie in Konkurrenz zu (teurem) Gaskesselbetrieb	Skaleneffekte großer Solarthermieranlagen Trend zur Dekarbonisierung	Kommunale Versorger und Bürgerenergie-Genossenschaften (→ Dänemark!)
Bidirektionale Funktion (dezentrale Solarthermie-Einspeisung in Wärmenetz)	Nutzung von Solarwärmeüberschüssen	Digitalisierung	Anlagenhersteller
Sektorkopplung (Strom-Wärme, PtH, PtG...)	FEE-Überschüsse, niedrige bis negative Börsenstrompreise Begrenzte EE-Potenziale und schleppende Fortschritte bei der Wärmewende	Digitalisierung	Kommunale Versorger
LowEx-Konzepte (Rücklaufeinbindung, Mehrstufen-Temperaturbereitstellung....)	Einbindung von Niedertemperaturquellen (erneuerbare Energie, Umgebungswärme, Abwärme) Reduktion von Wärmeverteilverlusten Reduktion von Infrastrukturkosten (Kunststoff- statt Stahlrohre / weniger bis keine Dämmung)	Trend zu Flächenheizungen (im Neubau)	Ingenieurbüros / Planer

### 3.1.4 MLP und abgeleitete Forschungsfragen

In Abb. 3-4 sind die in Abb. 3-1 schematisch dargestellten Rahmenbedingungen auf Regime- und Landscape-Ebene, Zielzustände, Nischen-Technologien bzw. Innovationen sowie Transformationskonzepte explizit für das Themenfeld Wärmenetze aufgeschlüsselt.



**Abb. 3-4 MLP-Darstellung für die Transformation von Wärmenetzen**

Bemerkung: Diese Darstellung orientiert sich an den kommenden drei Transformationsphasen (siehe Abb. 4-2) und nicht an den vier MLP-Phasen für eine Transformation (siehe Abb. 2-1). Bitte den Lesehinweis auf Seite 11 beachten!

Aus der obigen Analyse ergeben sich folgende Forschungsfragen in Bezug auf die Transformation von Wärmenetzen.

### F&E zu Umsetzungsvoraussetzungen auf der Nachfrageseite:

- Welche technischen und praktischen Umsetzungs-Lösungen lassen sich für Mehrfamilienhäuser entwickeln, um dezentrale Gasetagenheizungen durch zentrale Heizsysteme zu ersetzen, so dass effiziente Technologien und erneuerbare Energieträger und ein Wärmenetzanschluss überhaupt erst zum Einsatz kommen können? Eine Herausforderung ist dabei die gleichzeitige Umstellung der dezentralen Warmwasserbereitung mittels Gaskessel auf z. B. etagenweise Trinkwasserstationen.
- Wie können Hausbesitzer überzeugt werden, sich an (nachhaltige) Wärmenetze anzuschließen, um somit die Wirtschaftlichkeit der Investitionen zu verbessern (Informationskampagnen, Malus-/Bonussysteme...)?
- Wie kann bei Nutzern Bewusstsein geschaffen werden für die Notwendigkeit, die Systemtemperaturen im Gebäude durch geeignete Maßnahmen (Dämmung, Flächenheizungen, hygienische Trinkwarmwasserbereitung...) abzusenken? Wie können LowEx-Belohnungssysteme etabliert werden und wie wären sich rechtlich umsetzbar?

### **F&E zu Umsetzungsvoraussetzungen auf der Angebotsseite:**

- Welche technischen und gesellschaftlichen Herausforderungen sind mit der Etablierung von Niedertemperatur-Systemen (LowEx) verbunden? Und welche Herausforderungen mit der verstärkten Integration erneuerbarer Energien (neue Akteure, neue Kompetenzen, saisonale Schwankungen, stärkere Berücksichtigung der Nachfrageseite)?
- Wie kann der Prozess eines potenzialorientierten Ausbaus<sup>9</sup>, Umbaus und ggf. auch Rückbaus von Wärmenetzen angestoßen, etabliert und standardisiert werden? Welche Tools können die Entscheidungsfindung vereinfachen und beschleunigen? Wie können kommunale Master-Wärmepläne entwickelt und durch die Politik unterstützt werden? Wie kann dabei aus erfolgreichen Erfahrungen aus dem Ausland (z. B. Dänemark) gelernt werden?
- Welche Flächen- und Potenzialrestriktionen müssen für flächen- bzw. raumintensive erneuerbare Energieerzeuger (Solarthermie, Geothermie, Aquiferspeicher, Windenergie...) beachtet werden?
- Wie kann das Aufbrechen der Wärmenetze in (dezentralere) Sub-Netze gestaltet werden? Welche politischen Rahmenbedingungen sind dafür erforderlich?
- Welche mess-, regel-, informations- und kommunikationstechnischen Erfordernisse ergeben sich aus den neuen Anforderungen wie Sektorkopplung (PtH, PtG...) und bidirektionale Einspeisung?
- Wie kann eine geeignete, an den Klimaschutzziele orientierte Roadmap zur Entwicklung nachhaltiger Wärmenetze aussehen? Wann müssen welche Technologien (Einspeiser, energieeffiziente und LowEx-fähige Gebäude, Speicher, Netze und Kommunikationseinrichtungen) vorliegen?
- Welche Prozesse lassen sich etablieren, um Windows-of-Opportunities rechtzeitig zu erkennen und zu nutzen (Bsp.: anlassbezogene Nutzung kommunaler Abwasserwärme bei Entwicklung von Neubauquartieren, bei Quartierssanierung oder bei Kanalsanierung)?

### **F&E zu gesellschaftlichen Implikationen und Anreizmodellen:**

- Welche Bedeutung haben gesellschaftliche Megatrends wie Urbanisierung, Silver-Society (alternde Gesellschaft), Migration, Klimawandel, Dezentralisierung und Digitalisierung in Bezug auf Wärmenetze?
- Wie müssen Bürgerbeteiligungen ausgestaltet werden, um die Umsetzungswahrscheinlichkeit von nachhaltigen Wärmenetzprojekten zu erhöhen?
- Wie kann eine interkommunale Einbindung über mehrere Städte und Stadtwerke hinweg gelingen?

---

<sup>9</sup> „Potenzialorientiert“ meint hier unter Berücksichtigung räumlicher Potenziale erneuerbaren Energien, Abwärme und Gebäudeeffizienz sowie demographische Entwicklung vor Ort und konkurrierender Gasnetze.

- Wie können gesellschaftliche Akteure frühzeitig und in kooperativer Weise zusammengebracht werden? Wie können interdisziplinäre „Transformationskonsortien“ mit Vertretern aus Kommunen, Stadtwerken, Wissenschaft, Netzwerken, Herstellern und Planern aus unterschiedlichen Disziplinen etabliert werden, welche in der Lage sind, eine integrierte Analyse technisch-infrastruktureller sowie sozio-ökonomischer und -kultureller Umsetzungsvoraussetzungen vorzunehmen?
- Welche Hemmnisse müssen überwunden werden und welche Anreizinstrumente werden benötigt, um die brachliegenden Abwärmepotenziale zu heben (z. B. Deklaration von Abwärme als entsorgungspflichtiger Abfall...)? (Schüwer 2016)
- Welcher finanziellen und fiskalischen Anreizmodelle bedarf es, um Akteuren langfristige Investitionssicherheit zu vermitteln (z. B. gestufte und planbare Einführung wirksamer CO<sub>2</sub>-Preise, sukzessives Anheben einzuhaltender Energieeffizienzklassen für Gebäude etc.)? Wie kann eine begleitende Ausgestaltung wirkungsvoller Anreizmechanismen in Richtung Wärmewende allgemein und grüne Wärmenetze speziell aussehen? Beispielsweise soziale Ausgestaltung von
  - CO<sub>2</sub>-Bepreisungsmechanismen... (vgl. sozial-ökologische Forschung SÖF)
  - sukzessivem Auslaufen fossiler Wärmeerzeuger (Gas- und Ölkessel)
    - siehe Bsp. Dänemark
  - Einführung von EE-Quoten für Fernwärme
- Wie kann eine sozioökonomische Begleitforschung zu technisch innovativen Förderprogrammen wie z. B. „Wärmenetzsysteme 4.0“ ausgestaltet werden?
- Welche Anreizstrukturen können speziell für LowEx-Konzepte geschaffen werden?
  - weitere Anstrengungen bei der Gebäudesanierung
  - Belohnungs- / Malus-Systeme für niedrige / hohe Rücklauftemperaturen
  - Etablierung von Flächenheizungen z. B. durch innovative Dämmsysteme (außenliegende Wandheizung)

## 3.2 „Systemischer“ F&E-Bedarf im Technologiefeld Windenergie

### 3.2.1 Windenergie in der Multi-Level-Perspective: Konkurrenz zum Regime

Windenergie an Land wird als eine energiewenderrelevante Innovation im Elektrizitätsbereich betrachtet, welche die Nische bereits verlassen hat. Gemäß MLP-Systematik ist sie „in Konkurrenz zum Regime“ getreten (siehe Kapitel 2.2.1).

Diesen Erfolg hat die Windenergie verschiedenen positiven Treibern zu verdanken (Rogge et al 2015:20), die nach den MLP-Ebenen unterschieden werden können: In der Nischen-Ebene hat Windenergie eine hohe Dynamik, da es sich um die erneuerbare Energie mit der höchsten Wettbewerbsfähigkeit / dem größten Potenzial handelt. Auf der Regime-Ebene bestehen trotz steigender Akzeptanzprobleme vor Ort immer noch positive Einstellungen und gesellschaftliche Allianzen zur Unterstützung der Windenergie. Dies betrifft vor allem die Windenergie als klimafreundliche Alternative zur Atomenergie. Damit wird Windenergie gleichzeitig auf der Landscape-Ebene als ein Problemlöser für den Klimawandel gesehen. Weiterhin wird Windenergie - insbesondere in dezentraler Ausprägung an Land - energiepolitisch als eine Alternative zu den großen Energieversorgungsunternehmen (EVU) gesehen.

### 3.2.2 Soziotechnischer Wandel des Regimes

Mit dem Durchbruch der Windenergie hat gleichzeitig auch eine Destabilisierung des Regimes eingesetzt (Geels et al 2017). Im engeren Sinne sind hier Aspekte des Energiesystems zu nennen, vor allem zunehmende Schwierigkeiten bei der Aufnahme von Windkraftkapazität in vorhandene techno-ökonomische Strukturen. Hier werden zunehmend Anpassungen auf technischer (Netzführung, Netzausbau etc.), wie auf institutioneller Ebene (Marktdesign) notwendig. Im weiteren Sinne sind mit dem Durchbruch der Windenergie gesellschaftliche Änderungen auf Regime-Ebene eingetreten, insbesondere in Bezug auf die Akteure: der traditionell hohe politische Einfluss der EVU hat abgenommen, deren alte Geschäftsmodelle funktionieren nicht mehr und das EE-Geschäft haben sie bisher weitgehend verpasst bzw. erst in allerletzter Zeit aufgegriffen. Dagegen sind neue Akteure in den Markt eingetreten, welche die Umstrukturierungen als Chance sehen.

Mit dieser Destabilisierung des Regimes gehen eine Reihe von Konflikten bzw. *sozio-technischen* Problemen einher. Diese gehen über das einzelne Technologiefeld Windenergie hinaus und entstehen aus den oben genannten systemischen und gesellschaftlichen Änderungsprozessen, die mit der Integration großer Windkraftkapazität einhergehen.

Rogge et al. (2015) unterscheiden nach soziotechnischen Problemen im Erzeugungs-Regime einerseits und im Netzwerk-Regime andererseits. Im Erzeugungsregime (Rogge et al. 2015:6,31f) werden Schwierigkeiten und Unsicherheiten beim Kohleausstieg genannt. Weiterhin spielen Bedenken wegen (kurzfristiger) Wind-Ausbaukosten gegenüber langfristigen volkswirtschaftlichen Gewinnen (Aufbau neuer Industrie) eine Rolle. Trotz erster Anpassungen gibt es weiterhin Bedenken wegen neuer Markt- und Systemregeln zur Markt- und Systemintegration. Schließlich zeigen neue Abstandsregeln in Bayern & Nordrhein-Westfalen, dass politische Bedenken wegen potentieller öffentlicher Akzeptanzprobleme, insbesondere vor Ort, einen Einfluss auf den Ausbaupfad haben können.

Soziotechnische Probleme im Netzwerk-Regime (Rogge et al. 2015:6,36) bestehen vor allem in einer geringen öffentlichen Akzeptanz des Netzausbaus. Weiterhin gibt es Motivations- und finanzielle Hindernisse zur Nachfrageflexibilisierung (Smart Meter) sowie regulatorische Rigidität (lange Lebenszeit der Kapitalgüter, „konservatives Denken“). Schließlich sind Interessenkonflikte zwischen den Bundesländern und Wahlkreisen bei der Trassenplanung zu lösen.

Insgesamt verschiebt sich der F&E-Bedarf damit zunehmend auf die Lösung dieser soziotechnischen Herausforderungen der Systemumstellung. Neben eher „klassischen“ energiesystemischen Fragestellungen (die dennoch über das reine Technologiefeld hinausgehen – z. B.: Markt- und Systemregeln) betrifft dies eine Reihe weitergehender gesellschaftlicher Fragen. Für letztere bilden die genannten Erzeugungs- und Netzregimes zwar Kristallisationspunkte, sie gehen aber deutlich darüber hinaus. Besonders bei offenen Fragen – d. h. F&E-Bedarfen – zur Einbindung von Stakeholdern oder zu Umsetzungsdefiziten der Energiewende wird deutlich, dass es sich um gesellschaftliche Fragen handelt, die einen unmittelbaren Einfluss auf das Technologiefeld Windenergie haben, aber über die rein technologische Ebene hinausgehen.

### 3.2.3 F&E-Bedarf Technologieentwicklung und Systemintegration

#### Transdisziplinäre Einbindung von Stakeholdern

Eine bessere transdisziplinäre Einbindung von Stakeholdern wird als wesentliche Voraussetzung zur Verbesserung der Akzeptanz von Windenergie betrachtet. Dies gilt sowohl für den weiteren Ausbau von Windenergiekapazitäten selbst als auch für die zugehörige Netzinfrastuktur. Hier bestehen F&E-Bedarfe zur Erarbeitung von Strategien für unterschiedliche Formen der Beteiligung (finanzielle und andere). Weiterhin besteht insbesondere ein verstärkter F&E-Bedarf für neue Formate wie z. B. Reallabore (siehe Kap. 4.2).

#### Soziotechnische Begleitforschung

In der soziotechnischen Begleitforschung bestehen F&E-Bedarfe in der Abwägung der Vorteile (insbesondere geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen) der Windenergie mit anderen Umwelteffekten. Hier stehen Artenschutz-Konflikte und Flächenverbrauch der Windenergie im Fokus. Dazu gehören auch Strategien des Repowering und des Rückbaus. Weiterhin sind Recyclingfähigkeit und Rohstoffverbrauch (inklusive kritischer Ressourcen) zu berücksichtigen.

Im direkten Zusammenhang mit der Einbindung von Stakeholdern steht die soziotechnische Begleitforschung zu den infrastrukturellen Folgen unterschiedlicher Ausbau-Verhältnisse der verschiedenen erneuerbaren Energien (insbesondere Wind-zu-PV): Unterschiedliche Verhältnisse haben unterschiedliche Implikationen für den notwendigen Netz- und Speicherausbau. Hier besteht F&E-Bedarf, um die unterschiedlichen Ausbauverhältnisse mit Akzeptanzgrenzen und gesellschaftlichen Präferenzen zu verschnitten.

Schließlich besteht F&E-Bedarf zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen (Regelleistung, Momentanreserve, Schwarzstartfähigkeit etc.) in einem windbasierten System.

### 3.2.4 F&E-Bedarf Systeminnovation

#### Dezentralisierung, Sektorkopplung, Digitalisierung

Definitionsgemäß folgt die Systeminnovation als proaktive Strategie auf die Integration. Systemisch betrachtet besteht in Bezug auf Windenergie F&E-Bedarf zur Erhöhung der Aufnahmekapazität des Energiesystems für fluktuierenden Strom. Ein wichtiger Aspekt sind die Stromnetze, d. h. die Beseitigung und/oder das Management von Engpässen in Übertragungs- und Verteilnetzen (Netz-Optimierung vor Verstärkung vor Ausbau, NOVA). Damit verbunden besteht großer F&E-Bedarf in Bezug auf Digitalisierung (Smart Grids), Dezentralisierung und Sektorkopplung (Bidirektionalität der Verteilnetze, dezentrale Stromverwendung und –einspeisung). Insbesondere Digitalisierung kann als Landscape-Trend bezeichnet werden, der über das Technologiefeld Windenergie hinausgeht, aber auch Dezentralisierung und Sektorkopplung verändern nicht nur das Energiesystem, sondern auch die Gesellschaft grundlegend. Daher bestehen hier hohe F&E-Bedarfe zur Entwicklung proaktiver Strategien.

Marktbezogen besteht F&E-Bedarf zur Anpassung von Markt- und Systemregeln an die Eigenschaften der Windenergie (Kurzfristigkeit, Prognoseunsicherheit).

### **Potenzialanalysen Flexibilitätsoptionen**

Durch die Kombination aus absehbarer Dominanz fluktuierender Einspeisung mit den oben genannten großen Trends Dezentralisierung, Sektorkopplung und Digitalisierung entsteht ein großer F&E-Bedarf für Potenzialanalysen für Flexibilitätsoptionen. Neben Flexibilisierung der Nachfrage, systemdienlichen Speichern und verschiedenen Optionen durch die Sektorkopplung betrifft dies auch die Flexibilisierung des konventionellen Kraftwerkssegments (wodurch die Aufnahmefähigkeit für Windenergie steigt), wobei die Hemmnisanalyse des letzten Punkts zu weiterreichenden gesellschaftlichen Fragen führt.

## **3.2.5 F&E-Bedarf Systemtransformation (Systemanalyse)**

### **Szenarien und Modelle**

Es besteht auch F&E-Bedarf in der „klassischen“ Energiesystemmodellierung. Hier ist es notwendig, aktuelle und zukünftig absehbare Marktregeln (5-Minuten-Produkte, agentenbasierte Modellierung für Direktvermarktung) besser abzubilden. Weiterhin sollten die Windenergie-Eigenschaften in Modellen besser abgebildet werden (Kurzfristigkeit, Prognoseunsicherheit).

### **Defizit- & Hemmnis-Analysen /Market-pull- & Management-Instrumente**

Es besteht hoher F&E-Bedarf zur Analyse und Überwindung politischer Hemmnisse und zur Entwicklung von Strategien zur Beseitigung derzeit vorherrschender Umsetzungsdefizite der Energiewende. Es handelt sich somit um Analysen politischer Prozesse und Durchsetzbarkeit, d. h. um alle jene Aspekte, die jenseits der „klassischen“ Energiesystemmodellierung liegen (Geels 2017).

Wesentliche F&E-Bedarfe bestehen für die Erforschung von Umsetzungsstrategien für Market-Pull-Instrumente im konventionellen Bereich des Energiesystems bzw. -markts, welche die Wettbewerbsfähigkeit der Windenergie erhöhen. Dazu zählt vor allem die Umstrukturierung / Flexibilisierung des konventionellen Kraftwerks-Segments. Hierfür ist ein Kohleausstieg notwendig und es bestehen vor allem F&E-Bedarfe für die Entwicklung von Strategien zur oben genannten politischen Durchsetzbarkeit. D. h. die Forschung muss neben energiesystemischen Bewertungen vor allem politische Analysen und Aspekte der Sozialverträglichkeit mit einbeziehen. Dazu gehören Strategien für ein sozialverträgliches Management des Strukturwandels. Auch hier ist die Nutzung neuer Formate (z. B. Reallabore) wichtig.

Ähnliches gilt für die notwendige Änderung des Preisgefüges, welche die Wettbewerbsfähigkeit der Windenergie erhöhen (und die externen Kosten des Klimawandels internalisieren) würde. Hier bestehen F&E-Bedarfe vor allem zur Verbesserung der politischen Durchsetzbarkeit von an sich bekannten Maßnahmen, wie Emissionshandel und CO<sub>2</sub>-Steuern. Auch hier stehen die Analyse von Hemmnissen und die Ausarbeitung von politisch realistischen Umsetzungsstrategien im Vordergrund.



Weiterhin bestehen F&E-Bedarfe zur besseren Kommunikation der Finanzierung der Energiewende sowie eine (Weiter)Entwicklung transparenter Systeme zur Finanzierung unter Berücksichtigung externer Kosten der fossilen Referenzsysteme. Ersteres gilt vor allem mit Blick auf die verzerrte Kostendiskussion, die sich an der Höhe der EEG-Umlagen manifestiert. Weiterhin besteht ein Zusammenhang zum oben genannten Management des (fehlenden) Strukturwandels im Kraftwerks-Segments (niedrige Großhandelspreise).

Schließlich ist bei allen Analysen das Mehrebenensystem zu beachten: Hier besteht die Notwendigkeit, nationale Analysen auf EU- als auch auf kommunale Ebene auszuweiten.

### **Pfadabhängigkeiten**

Schließlich bestehen F&E-Notwendigkeiten zur Analyse von Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekten, die in Bezug auf Windenergie eine Rolle spielen können. Dies betrifft z. B. die Auswirkungen von weiteren Verzögerungen beim Netzausbau. Weiterhin resultieren aus unterschiedlichen geographischen Verteilungen des Windenergieausbaus, die aus den Verzögerungen beim Netzausbau oder aus Akzeptanzproblemen des Windausbaus selbst entstehen können (Abstandsregeln), auch Pfadabhängigkeiten.

## 4 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Zur einem sollte sich die Forschung an der Phase, d. h. am Fortschritt der Energiewende orientieren (Kapitel 4.1). Dabei kommt neuen Forschungsformaten eine steigende Bedeutung zu (Kapitel 4.2). Schließlich werden die F&E-Empfehlungen auf die Ziele *Integration, Innovation, Transformation* heruntergebrochen (Kapitel 4.3).

### 4.1 Ausrichtung an Transformationsphasen der Energiewende

Eine Transformation des Energiesystems<sup>10</sup> erfolgt aufgrund der Größe und Komplexität des Systems in der Regel über einen längeren Zeitraum und wird durch eine Vielzahl von Faktoren bzw. Entwicklungen auch und gerade jenseits von Technologien beeinflusst. Sie ist durch einen Anfangszustand und einen davon (grundlegend) abweichendem Ziel- bzw. Endzustand des Systems gekennzeichnet. Dabei kann zwischen nicht-normativen (adaptiven/selbsteinstellenden, endogenen) und normativen (gesteuerten, exogenen) Transformationen unterschieden werden. Erstere finden durch fortlaufende Veränderungen und Innovationen ohnehin statt und können quasi als Referenz-Transformationen des Systems angesehen werden. Die normative Transformation folgt dagegen in der Regel einer Vision und strebt einen Zielzustand an, der durch einen oder wenige Meta-Parameter beschrieben wird. Zu den normativen Transformationen gehört z. B. kurz- bis mittelfristig der in Deutschland beschlossene Ausstieg aus der Kernenergienutzung bis zum Jahr 2022 und langfristig die Energiewende. Letztere wird bisher vor allem durch die beiden folgenden, übergeordneten Ziele bis zum Jahr 2050 bestimmt (BMWi/BMU 2010):

- 1 | Reduktion der jährlichen THG Emissionen um mindestens 80 bis 95 % gegenüber dem Jahr 1990
- 2 | Erhöhung des Anteils von erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch auf (mindestens) 80 % und am Bruttoendenergieverbrauch auf (mindestens) 60 %

Darüber hinaus bestehen weitere Zwischen- bzw. Teilziele, die sich auf verschiedene Zeiträume und Sektoren beziehen. Allein anhand dieser Zwischenziele und den damit verbundenen neuen Systemzuständen lässt sich die gesamte Transformation in Phasen unterteilen. Die fortlaufenden Entwicklungen führen jedoch auch unabhängig von diesen willkürlich abgrenzbaren Stadien zu Phasen (bzw. Zwischenzuständen), die sich in ihren grundlegenden Eigenschaften und Herausforderungen für die weitere Gestaltung der Transformation und damit für die Forschung und Entwicklung unterscheiden. Beispiele für entsprechende Phasenunterteilungen der Energiewende zeigen die folgende Abb. 4-1 und Abb. 4-2. Bei diesen Phasen handelt es sich nicht um MLP-Phasen (vgl. Abb. 3-1).

---

<sup>10</sup>

Dieses umfasst die einschlägigen technischen, ökonomischen/energiewirtschaftlichen und sozialen Bereiche wie z. B. Kraftwerke, Energieleitungen, Energiemärkte und Energiekunden sowie Energiepolitik.

	Phase 1 (ca. 1990–2014)	Phase 2 (ca. 2014–2025)	Phase 3 (ca. 2025–2040)	Phase 4 (ca. 2040–2060)
Angebot	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamischer Ausbau der Erneuerbaren</li> <li>• Hoher Anteil privater Investitionen</li> <li>• Schrittweiser Ausstieg aus der Atomenergie</li> <li>• Auf- und Ausbau F&amp;E-Kapazitäten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortgesetzter Ausstieg aus der Kernenergie</li> <li>• Fortgesetzter EE-Ausbau, durch Lernkurveneffekte befördert</li> <li>• Zunehmende EE-Investitionen von Energieunternehmen</li> <li>• EE erbringen Systemdienstleistungen</li> <li>• Flexibilisierung des Kraftwerksparks</li> <li>• Zunahme der Eigenversorgung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abgeschlossener Ausstieg aus der Kernenergie</li> <li>• Fortgesetzter EE-Ausbau (verstärkt: Repowering)</li> <li>• Drastischer Rückgang Kohle-Verstromung</li> <li>• Schrittweise Substitution von Erdgas durch PtG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortgesetzter EE-Ausbau</li> <li>• Deckung des zusätzlichen Strombedarfs teilweise durch EE-Importe</li> <li>• Zunehmende Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe</li> </ul>
Nachfrage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundsätzliche Erkenntnis, dass Energieeffizienz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deutliche Effizienzsteigerungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nachfrage aufgrund neuer Stromverwendung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortgesetzte Verdrängung fossiler Energie</li> </ul>

**Abb. 4-1 Die Transformationsphasen des Energiesystems (vergrößerter Auszug aus der Abbildung zwecks besserer Lesbarkeit)**

Quelle: Fischedick in FVEE (2014)

Phase 1 „Entwicklung EE“	Phase 2 „Systemintegration“	Phase 3 „Synth. Brennstoffe“	Phase 4 „EE-Import“
CO <sub>2</sub> -Reduktion ~ 0-20%	CO <sub>2</sub> -Reduktion ~ 20-50%	CO <sub>2</sub> -Reduktion ~ 50-75%	CO <sub>2</sub> -Reduktion ~ 75-100 %
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Entwicklung Basistechnologien</li> <li>■ Wesentliche Kostenreduktionen</li> <li>■ Markteinführung und Ausbau ohne signifikante Implikationen für Gesamtsystem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aktivierung von Flexibilitäten bei residualer Stromerzeugung und -nutzung</li> <li>■ Kurzzeitspeicher</li> <li>■ Demand Side Management</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Signifikante negative Residuallasten</li> <li>■ Nutzung von EE-Strom zur Erzeugung synthetischer Brennstoffe</li> <li>■ Verwendung vorrangig für Mobilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Vollständige Verdrängung fossiler Ressourcen in allen Nutzungsbereichen</li> <li>■ Import von erneuerbaren Energieträgern, z.B. aus sonnenreichen Regionen</li> </ul>
Fortwährend kontinuierliche Erhöhung der Effizienz auf der Nutzungsseite <ul style="list-style-type: none"> <li>■ baulicher Wärmeschutz Gebäude</li> <li>■ Reduktion Stromverbrauch in klassischen Verbrauchsbereichen (z.B. Beleuchtung, Pumpen und Antriebe, ...)</li> </ul>			



**Abb. 4-2 Hauptphasen der Transformation des Energiesystems**

Quelle: Henning in FVEE (2014)

Die vorherigen Phasendarstellungen beziehen sich zunächst auf unterschiedliche Indikatoren (EE-Anteile, technologische Reifegrade, Zeiträume und CO<sub>2</sub>-Reduktion) und lassen sich damit nicht direkt vergleichen. Zudem werden sie verschieden ausführlich durch qualitative Beschreibungen der Eigenschaften und Trends abgegrenzt.

Für eine generelle Anwendung und stärkere Berücksichtigung von Transformationsphasen in der Energieforschung wird eine Strukturierung durch den gemeinsamen übergeordneten Leitindikator des THG-Reduktionsgrades als zielführend angesehen. Die Transformationsphasen sind daher in der Regel wie oben in Abb. 4-2 durch den roten Pfeil rechts abzugrenzen. Das bedeutet Phase 1 (0 bis -20 %), Phase 2 (-20 % bis -50 %), Phase 3 (-50 % bis -75 %) und Phase 4 (-75 % bis -100 %).

Dabei ist zu beachten, dass die Phasen sektoral und regional<sup>11</sup> betrachtet bereits fast alle vorkommen und daher differenziert zu betrachten bzw. auszuweisen sind.

Aus den Transformationsphasen werden die folgenden Anforderungen an die künftige Energieforschung inkl. *künftigem F&E-Bedarf* abgeleitet:

- Standardisierung der Erstellung und Auswertung von Transformationsphasen
- Bestimmung von Transformationsphasen (TP) ergänzend zum Strom auch für die anderen Endenergien (Brennstoffe, Kraftstoffe und Wärme) und anderen Sektoren (Industrie, Haushalte, Verkehr, Landwirtschaft)
- Analyse von Wechselwirkungen zwischen den Transformationsphasen und der Wirkungen von Verzögerungen/Änderungen auf die Transformationsphasen
- Identifikation und Bewertung von Pfadabhängigkeiten in bzw. durch Transformationsphasen
- Ausrichtung der experimentellen Forschung (Reallabore, siehe unten) auf die verschiedenen Transformationsphasen

Die Bestimmung und Anwendung von Transformationsphasen kann sich ggf. deutlich von den Phasen unterscheiden, die durch die Anwendung der MLP entstehen (siehe Beispiele zu Wind und Wärmenetze). Es ist aber auch eine Verschneidung von beiden Analyseinstrumenten vorstellbar. Dies gehört im Sinne einer Weiterentwicklung mit zum künftigen Forschungsbedarf.

## 4.2 **Stärkung experimenteller und umsetzungsorientierter Forschung durch Reallabore**

Reallabore sind ein vieldiskutiertes neues Forschungsformat, das dazu dienen soll, die wissenschaftliche Forschung in der Gesellschaft „anschlussfähig“ zu machen<sup>12</sup>. Daher wird an dieser Stelle etwas ausführlicher auf dieses neue Forschungsformat eingegangen.

### 4.2.1 **Warum und wozu Reallabore?**

Reallabore sind neben der oben genannten MLP eine wichtig Ergänzung der bisher stark technologisch geprägten Energieforschung, im Sinne der folgenden Textpassage einer Rede anlässlich des Jubiläums „40 Jahre Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“:

„Die Energieversorgung ist ein Problem, das von Experten gelöst wird – vornehmlich mit technischen Mitteln. – Aus heutiger Sicht ist das eine fahrlässige Vereinfachung.“ (BMWi 2017).

Technologische Forschung und Entwicklung birgt generell das Risiko, dass bezogen auf die spätere Anwendung und Umsetzung an den Realitäten bzw. Erwartungen vorbei geforscht wird. Dazu gehören z. B. im Labor optimierte Heizungs-Technologien, die später nicht ohne Anpassung in den Keller (stationäre Brennstoffzelle) passen, fehlende Abstimmung und Unterschätzung bezogen auf systemrelevante Ent-

---

<sup>11</sup> Die CO<sub>2</sub>-Reduktionswerte reichen in Deutschland von nahezu 100 % (autarke Gemeinden bzw. Regionen mit ca. 100 % EE-Stromanteil) bis relativ gering (z. B. im Ruhrgebiet).

<sup>12</sup> Ein wesentlicher Unterschied zu anderen transdisziplinären Methoden ist die stärkere räumliche Fokussierung.

wicklungen (50,2-Hz-Problematik bei PV) oder fehlende Standards (Laden von Elektroautos), die die Endkunden abschrecken. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl von möglichen Akzeptanzproblemen, die selbst eine sehr gute anwendungsorientierte Forschung noch zum Misserfolg führen kann.

Diese zum Teil unerwartbaren Probleme und Risiken (*black swans*) können naturgemäß nicht vollständig vermieden werden, aber sie können früher identifiziert und reduziert werden. Dazu gehören auf der anderen Seite der „Medaille“ auch unerwartete Zusatznutzen von Innovationen, die erst im Verlauf der Anwendung oder durch Zufall entdeckt werden. Eine zunehmend wichtige Lösung bieten die sogenannten Reallabore an, die gezielt u. a. Forschung und Anwendung auf Augenhöhe zusammenbringen.

Reallabore sind daher auch schon längst Teil der Energieforschung (vgl. BMWi 2017b: 33, 43):

- Mit dem Energy Lab 2.0 baut das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) und dem Forschungszentrum Jülich einen energietechnischen Anlagenverbund auf. Komponenten zur Erzeugung, Wandlung und Speicherung von elektrischer, thermischer und chemischer Energie werden hierbei verknüpft und *bilden gemeinsam mit bestehenden Verbrauchern ein „Reallabor“*. Windparks, Geothermie-Anlagen, Elektrolyseanlagen, konventionelle Kraftwerke und industrielle Verbraucher werden informationstechnisch eingebunden. Dies erlaubt es, die verschiedenen Energienetze (Strom, Wärme, Gas, Kraftstoffe) in einem Gesamtenergiesystem („Smart Energy System“) anwendungsnah zu untersuchen.
- Im Verkehrssektor stützt sich die Energiewende maßgeblich auf eine umfassende Elektrifizierung. Der Forschungscampus Mobility2Grid erforscht, wie sich die Batteriekapazität von gewerblichen und privaten Elektrofahrzeugen in dezentrale intelligente Netze integrieren lässt, die auf erneuerbaren Energien basieren. Es werden sowohl grund- legende Technologien als auch Konzepte und Geschäftsmodelle erarbeitet und erprobt. Dazu *hat Mobility2Grid ein „Reallabor“ auf dem EUREF-Campus in Berlin-Schöneberg aufgebaut*. Hier werden die neuen Konzepte mit realen Nutzern „live“ erforscht und öffentlichkeitswirksam präsentiert.

Darüber hinaus hat eine Expertengruppe „Wissenschaft für Nachhaltigkeit“ im Auftrag des Baden-Württembergischen Wissenschaftsministeriums den Aufbau von „Reallaboren“ im Land als eine von sieben Empfehlungen erarbeitet. Deren Aufgabe ist, Transformationsprozesse zu einer Nachhaltigen Entwicklung gezielt wissenschaftlich anzuregen und zu begleiten. (MWK-BW 2013)

#### 4.2.2 Was sind Reallabore?

Reallabore sind inter- und transdisziplinäre Forschungsdesigns, die die Forschenden und die Anwender bzw. „Praktiker“ zusammenbringen um möglichst reale „Experimente“ zum Forschungsthema durchzuführen und „Praxis-Wissen“ zu generieren und zu sammeln.

Nach der Metaanalyse in (Schäpke 2017 und Literaturangaben dort) können Reallabore u. a. wie folgt charakterisiert werden:

- Sie sind ein derzeit populärer Forschungsansatz an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Gesellschaft
- Sie werden als „wissenschaftlich konstruierte Räume einer kollaborativen Nachhaltigkeitsforschung mit Interventionscharakter“ definiert.
- Im Fokus steht dabei, über Experimente Lösungen für Nachhaltigkeits Herausforderungen zu entwickeln und zu testen sowie eine Transformation und die ihr zu Grunde liegenden Dynamiken vertieft zu verstehen.
- In Reallaboren soll Wissen „über soziale Dynamiken und Prozesse“, „nachhaltigkeitsorientierte Transformationsprozesse“ sowie kontextspezifisches, sozial robustes Wissen, welches die „soziale Innovationskraft vor Ort befördert“ entstehen – somit sollen System-, Ziel und Transformationswissen erzeugt werden.
- Reallabore sollen ein Instrumentarium bieten, um gesellschaftliche Probleme zusammen mit Wissenschaft und mit Partnern wie Kommunen, Verbänden und wirtschaftlichen Akteuren gemeinsam vor Ort zu bearbeiten. Durch eine wissenschaftliche Begleitung lassen sich so gesellschaftliche Transformationsprozesse wie z. B. die Sanierung von Stadtteilen, die Einführung nachhaltiger Mobilitäts- oder Energiesysteme besser verstehen und gestalten.

Ein zentraler Forschungsmodus im Rahmen von Reallaboren ist die transdisziplinäre Kooperation (siehe MWK-BW 2013).

### 4.2.3 Chancen, Risiken und Grenzen von Reallaboren

Mit der Durchführung von Reallaboren werden von Forschern und Praktikern aus den Reallaboren der ersten einschlägigen Förderlinie in Baden-Württemberg die folgenden Neuerungen und Chancen verbunden (Schäpke 2017:6f):

- Verschiedene Prinzipien von transdisziplinärer Forschung umzusetzen
- Orte für neue Formen von Wissensproduktion zu entwickeln
- Eine Aktivierung, eine Ermächtigung und die Integration von gesellschaftlichen Akteuren zu ermöglichen
- Die hohe Komplexität [der Energiewende] in die gesellschaftliche Praxis zu tragen und transparent zu machen
- Praxis [Realitäten] und Forschung zusammenzubringen und alle Beteiligten in Verantwortung zu bringen sowie
- Die Wirkung und Qualität der Forschung an anderem Output/Impact (Ergebnis/Wirkung) wie z. B. Verstetigung und Ausbreitung zu messen.

Darüber hinaus bieten sie die Chance mehr konkretes Wissen über gesellschaftliche Hemmnisse und Probleme zu sammeln sowie über die Gründe für den Erfolg und (genauso wichtig) für den Misserfolg von Innovationen, Forschung und Entwicklung. Dadurch können sie essentiell zum besseren Verständnis von Transformationsprozessen und als Folge zu ihrer besseren Gestaltung beitragen.

Diesen Chancen sind jedoch immer auch gegen die folgenden Probleme und „Risiken“ abzuwägen (Schäpke 2017: 6f; ergänzt um eigene Annahmen):

- Zwischen den Arbeiten und Ergebnissen aus dem Reallabor und der (möglichen) Wirkung gibt es zeitliche Verzögerungen, die bei Wirkungs-Analysen zu beachten sind



- Unrealistische Ziele bzw. zu hohe Erwartungen können zu Konflikten und zum Scheitern führen und damit die Offenheit und Akzeptanz für Forschung bzw. Reallabore beschädigen
- Im Sinne von wissenschaftlichen Experimenten müssen sie jedoch ergebnisoffen sein und ein Scheitern erlauben, was im Konflikt zu (externen) Erfolgszwängen steht
- Die Ergebnisse aus den Reallaboren sind im Vergleich zu rein wissenschaftlichen Laborexperimenten nicht reproduzierbar und nur bedingt übertragbar bzw. skalierbar. Sie sind zudem bisher häufig lokal, thematisch und zeitlich relativ eng begrenzt.

Reallabore sind daher zwar sehr wichtig für das bessere Verständnis der Transformationsprozesse und ihre Gestaltung. Sie können sie jedoch nicht per se bzw. in einem ausreichenden Maße garantieren bzw. auslösen, sondern nur vorbereiten und unterstützen. Ohne Schaffung von adäquaten Rahmenbedingungen wie z. B. Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer oder konkreten Vorgaben für die energetische Gebäudesanierung oder den Kohleausstieg wird die Energiewende nicht gelingen.

#### 4.2.4 Was folgt daraus für die künftige Energieforschung?

In erster Linie geht es darum, den Realitätscheck von anwendungsorientierter Forschung früher als heute üblich mitzudenken und durchzuführen. Das bedeutet, dass nicht-wissenschaftliche Stakeholder nicht erst z. B. ab einer Planung und Genehmigung von Pilotanlagen einbezogen werden, sondern schon beim Übergang vom Labor- in den Technikumsmaßstab, bei der Entwicklung von Anwendungsdesign und -strategie etc. Dafür bieten sich Reallabore, aber grundsätzlich auch andere Forschungsformate im Bereich von Akzeptanz und Partizipation an. Im einfachsten Fall sind bereits ein oder mehrere Workshops mit breiter Stakeholder-Beteiligung entlang des Forschungsvorhabens ausreichend, um eine praxisnähere Ausrichtung zu erreichen bzw. Fehlentwicklungen rechtzeitig identifizieren und reduzieren zu können.

Generell sind diesbezüglich die transdisziplinäre und die „experimentelle“ Energieforschung weiter zu stärken. Dabei sind zusätzlich methodische Anleihen an angrenzende Forschungszweige wie z. B. der Komplexitätsforschung, Entscheidungs- und Emergenztheorie bzw. des sogenannte „Cynefin-Frameworks“<sup>13</sup> vorzunehmen.

### 4.3 Forschungsbedarfe in den Bereichen Systemintegration, -innovation und -transformation (inkl. Systemanalyse)

#### 4.3.1 F&E-Bedarf im Bereich Technologieentwicklung und Systemintegration

- Soziotechnische Begleitforschung (ex-post und ex-ante) zu allen technologischen Förderinitiativen und -projekten mit Fokus auf Umsetzungsdefizite, Wechselwir-

<sup>13</sup>

Dieses stützt sich auf Forschungen aus der Theorie komplexer adaptiver Systeme, Kognitionswissenschaft, Anthropologie und narrativer Muster, sowie der evolutionären Psychologie. Es „untersucht die Beziehung zwischen Mensch, Erfahrung und Kontext“ und schlägt neue Wege vor für Kommunikation, Entscheidungsfindung, Richtlinienfindung und Wissensmanagement in komplexen sozialen Umfeld.“ (Wikipedia)

kungen zwischen Technologien, Systemdienlichkeit und Rückwirkungen auf das Energiesystem sowie zu Akteurseinflüssen (incumbent & emerging actors), Umweltwirkungen (Ressourcen-/Flächenverbrauch...), Akzeptanz, Regulierung (inkl. Nachfrageseite)

- Frühzeitige transdisziplinäre Einbindung von Stakeholdern (zum Beispiel in Form von Reallaboren) entlang der gesamten Wertschöpfungskette in die F&E-Arbeiten (inkl. Begleitforschung), z. B. beim Übergang in die Technikumsphase bzw. vor Pilotierung, um *Stranded Research* wie z. B. bei CCS zu vermeiden.

#### 4.3.2 F&E-Bedarf im Bereich Systeminnovationen als neues Forschungsfeld

- Identifikation und Bewertung von möglichen bzw. nötigen *Systeminnovationen* für eine proaktive Gestaltung der Energiewende. Dabei sind insbesondere Rolle und Potenzial von zunehmender Dezentralisierung, Sektorkopplung und Digitalisierung zu berücksichtigen.
- Untersuchungen (Potenzialanalysen) zur Flexibilisierung von vielfältig einsetzbaren Flex-Optionen (insbesondere P2X und Speicher) z. B. mittels Hybridisierung von Auslegungen zwecks adaptiven Einsatzstrategien.

#### 4.3.3 F&E-Bedarf im Bereich Systemtransformation (Systemanalyse)

- Szenarien und Modelle für ambitioniertere THG-Reduktionsziele (mindestens 95 %) sowie an Transformationsphasen und deren Übergängen, um Lock-In Effekte zu erkennen/reduzieren.
- Defizit- und Hemmnis-Analysen zur Identifikation, Bewertung und Lösung von Lücken zwischen der Energiewendeforschung und Umsetzung der Energiewende sowie von Reboundeffekten. Daraus zusätzliche Entwicklung von effektiven Market-pull- und Management-Instrumenten für eine bessere und agilere Verbreitung von Technologien, Systeminnovationen und des gesamten Energiewendeprozesses.
- Narrative Szenarien zur Energiewende, um neue wichtige Forschungsfragen für die Technologieentwicklung als auch die Modellierung abzuleiten, z. B. zu Suffizienz und Resilienz sowie geopolitischen Abhängigkeiten (bspw. Wirtschafts- und Energiepolitik von China, Indien und USA) oder angrenzender Märkte (bspw. Ersatzstoffe für Erdöl- und Raffinerieprodukte in Bau- und Chemieindustrie).
- Erweiterung von bisher kostenoptimierenden quantitativen Energiemodellen um soziotechnische Bewertungen
- Analysen zu Pfadabhängigkeiten, Lock-In Effekten, Unsicherheiten, Risiken (Disruptionen), nicht-linearen Entwicklungen und zu Verhalten (Rollen) von Stakeholdern diesbezüglich.
- Umsetzungsorientierte, ambitionierte kurz- bis mittelfristige Analysen („Energiewende in a hurry“). Dazu Identifikation von *Windows-of-Opportunities* (WoO) und von pro-aktiven, „schnellen“ Regime-Änderungen (zur Schaffung von WoO).



## Literaturverzeichnis

- AGFW (2017): AGFW-Hauptbericht 2016. Statistik. Frankfurt a.M.: AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.  
<https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht/>. Letzter Zugriff: 09 March 2018.
- BMWi (2017a): 40 Jahre Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Monatsbericht 6-2017  
[https://www.BMWi.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2017-06-40-jahre-energieforschung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.BMWi.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2017-06-40-jahre-energieforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=8). Letzter Zugriff: 25.01.18
- BMWi 2017b (Hrsg.): Bundesbericht Energieforschung 2017 – Forschungsförderung für die Energiewende; Berlin, März 2017
- BMWi (2018): 40 Jahre Energieforschung: Forschen für die Energiewende – Zukunftstrends der Energieforschung;  
<http://www.BMWi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/Energieforschung/40-jahre-energieforschungsprogramm.html>. Letzter Zugriff: 25.01.18
- BMWi, BMU (2010): Energiekonzept. Für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 28.09.2010
- DPG (2017): Energieforschungsprogramme 1974 bis heute  
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/ueberblick/geschichte/energieforschung-ab-1974/>. Letzter Zugriff: 25.01.18
- Geels, F. W. (2004): Processes and patterns in transitions and system innovations: Refining the co-evolutionary multi-level perspective; *Technological Forecasting & Social Change* 72 (2005) 681–696; Aug. 2004
- Geels, F. W. (2014): Deliverable D2.1: Analysis of green niche- innovations and their momentum in the two pathways (Main report: Introduction and findings); PATHWAYS project – Exploring transition pathways to sustainable, low carbon societies; Grant Agreement number 603942; Dez. 2014
- Geels, F. W. 2018: Disruption and low-carbon system transformation: Progress and new challenges in socio-technical transitions research and the Multi-Level Perspective, *Energy Research & Social Science*, Vol 37, S. 224-231
- Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., Sorrel, S. (2017): The Socio-Technical Dynamics of Low-Carbon Transitions. *Joule* 1, pp. 463-479, November 15
- Hauff, V. (2017): 40 Jahre Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Rede im Rahmen des Festakts  
[https://www.energieforschung.de/lw\\_resource/datapool/systemfiles/elements/files/4EC70D7200923446E0539A695E86A000/live/document/Rede\\_Dr\\_Volker\\_Hauff.pdf](https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/4EC70D7200923446E0539A695E86A000/live/document/Rede_Dr_Volker_Hauff.pdf). Letzter Zugriff: 25.01.18
- iit (2018): Systeminnovationen. <https://www.iit-berlin.de/de/themenfelder/systeminnovationen>. Letzter Zugriff: 17.12.2017

- Lund, H.; Werner, S.; Wiltshire, R.; Svendsen, S.; Thorsen, J. E.; Hvelplund, F.; Mathiesen, B. V. (2014): 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 681–11. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
- MWK-BW (Hrsg.) 2013: „Wissenschaft für Nachhaltigkeit – Herausforderung und Chance für das baden-württembergische Wissenschaftssystem; Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg; Juni 2013
- Rogge, K., Friedrichsen, N., Schlomann, B. (2015): *Exploring transition pathways to sustainable, low carbon societies*; Pathways-Project. deliverable D2.3: Integrated analysis of the feasibility of different transition pathways; Country report 1: Feasibility of transition pathways in German electricity system; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe, December 11, 2015
- Schäpke, N. et al. (2017). Reallabore im Kontext transformativer Forschung. Ansatzpunkte zur Konzeption und Einbettung in den internationalen Forschungsstand. (No. 1/2017) Leuphana Universität Lüneburg, Institut für Ethik und Transdisziplinäre Nachhaltigkeitsforschung.
- Schrape, J-F. (2014): Kurze Einführung in die Multi-Level Perspective. Skript vom 18.11.2014. <https://gedankenstrich.org/wp-content/uploads/2014/11/Kurze-Einf%C3%BChrung-in-die-Multi-Level-Perspective.pdf>. Letzter Zugriff: 23.01.2018
- Schüwer, D. (2016): Abwärmenutzungspotenziale in NRW - Vorstellung der aktuellen Studie im Auftrag des MKULNV. Presented at the Tagung der EA-NRW ‘Sektorübergreifende Transformation unseres Energiesystems’, Vortrag, Düsseldorf. <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/581>. Letzter Zugriff: 05 April 2017.
- Schüwer, D. (2017): Konversion der Wärmeversorgungsstrukturen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* (et) 6.
- Wagner, H.-F. 2017: "Energieforschungsprogramme von 1974 bis heute"; <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/ueberblick/...> Letzter Zugriff: 25.01.18
- Wettengl, S. (1999): Initiierung technologischer Systeminnovationen: Wege zur Vermeidung von Abwarteblockaden in Innovationsnetzwerken. Göttingen. Vandenhoeck & Rupprecht